

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

На правах рукопису

ІВІЦЬКИЙ ІГОР ІГОРОВИЧ

УДК [678.027+678.057]:678.073(043.3)

**ПРИСТІННІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСАХ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРІВ У КАНАЛАХ
ПЕРЕРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Спеціальність 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Сокольський Олександр Леонідович

кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРУ.....	13
1.1 Огляд математичних моделей течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів.....	13
1.1.1 Модель тертя на основі узагальненої ньютонівської моделі в'язкої рідини.....	13
1.1.2 Модель тертя на основі кінетичної теорії.....	17
1.1.3 Анізотропна модель тертя.....	20
1.2 Огляд методик визначення величини пристінних ефектів в полімерних матеріалах	21
1.2.1 Аналітичний метод розв'язання задачі течії рідини в приграничному шарі.....	21
1.2.2 Метод визначення в'язкосних властивостей розплаву й впливу стінки на ці властивості	23
1.2.3 Дослідження профілю швидкостей при течії розплаву в циліндричних каналах.....	28
1.2.4 Метод врахування пристінних ефектів при ковзанні розплаву по стінці каналу	31
1.2.5 Метод Муні.....	34
1.2.6 Поправка Рабіновича	35
1.3 Висновки і завдання досліджень	37
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	39
2.1 Дослідно-експериментальна установка	39

2.2	Методика дослідження	45
2.2.1	Методика виявлення наявності та характеру пристінних ефектів у полімерному матеріалі	47
2.2.2	Методика визначення параметрів матеріалу за умови його ковзання по стінці	48
2.2.3	Методика визначення параметрів матеріалу за умови утворення низькомолекулярного шару	49
2.3	Розрахунок похибок дослідження	51
2.3.1	Методика розрахунку похибок прямих вимірювань	51
2.3.2	Методика розрахунку похибок непрямих вимірювань	52
2.3.3	Розрахунок похибки вимірювання температури	53
2.3.4	Розрахунок похибки вимірювання маси	54
2.3.5	Розрахунок похибки вимірювання часу	56
2.3.6	Розрахунок похибки непрямих вимірювань швидкості зсуву	57
2.4	Визначення характеру, величини пристінних ефектів та параметрів матеріалу	58
2.4.1	Поліетилен високого тиску 15803-020	59
2.4.2	Поліетилен високого тиску з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105	63
2.4.3	Севілен 11104-030	67
2.4.4	Севілен 11104-030 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105	71
2.4.5	Полістирол марки ПС-С-1-3	75
2.4.6	Полістирол ПС-С-1-3 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105	79

2.4.7	Полістирол ПС-С-1-3 вторинний.....	83
2.5	Властивості матеріалу.....	87
2.5.1	Полістирол ПС-С-1-3.....	87
2.5.2	Поліетилен високого тиску 15803-020.....	88
2.5.3	Севілен 11104-030.....	89
2.6	Нестабільності потоку розплаву полімеру	90
2.7	Висновки	91
3	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ	92
3.1	Математична модель.....	92
3.2	Встановлення параметрів математичної моделі	93
3.2.1	Геометричні параметри та скінченноелементна сітка.....	93
3.2.2	Граничні умови математичної моделі.....	96
3.2.3	Дослідження збіжності сітки	96
3.2.4	Підтвердження адекватності моделі	98
3.2.5	Підтвердження адекватності ізотермічного припущення.....	100
3.2.6	Підтвердження адекватності екстраполяції результатів досліджень на некруглі канали	101
3.3	Результати математичного моделювання	102
3.3.1	Результати моделювання каналу циліндричної геометрії	102
3.3.2	Результати моделювання для каналу прямокутної геометрії	111
3.3.3	Результати моделювання для каналу з геометрією формууючої головки	116
3.4	Регресивні математичні моделі.....	119
3.4.1	Регресивна модель пристінних ефектів у конічному каналі	120
3.4.2	Регресивна модель пристінних ефектів у прямокутному каналі	123

3.5	Висновки	126
4	ВПРОВАДЖЕННЯ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	128
4.1	Головка екструзійна	128
4.2	Головка екструзійна	130
4.3	Черв'як екструдера	131
4.4	Впровадження результатів науково-технічних розробок	133
4.5	Висновки	134
	ВИСНОВКИ	135
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	138
	ДОДАТКИ	153
	ДОДАТОК А РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	154
	А.1. Дослідження полістиролу ПС-С-1-3	154
	А.2. Дослідження полістиролу ПС-С-1-3 за змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105	157
	А.3. Дослідження вторинного полістиролу ПС-С-1-3	160
	А.4. Дослідження поліетилену високого тиску 15803-020	163
	А.5. Дослідження поліетилену високого тиску 15803-020 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105	166
	А.6. Дослідження севілену 11104-030	169
	А.7. Дослідження севілену 11104-030 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105	172
	ДОДАТОК Б ПОВНИЙ ФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ	176
	ДОДАТОК В ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

B – висота каналу, мм;
 D_{ex} – діаметр входу каналу, мм;
 $D_{вих}$ – діаметр виходу каналу, мм;
 H – ширина каналу, мм;
 k – коефіцієнт тертя;
 L – довжина каналу, мм;
 n – індекс течії;
 P – тиск, Па;
 Q – об’ємна витрата, м³/с;
 R – радіус каналу, мм;
 T – температура, °C;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;
 η – динамічна в’язкість, Па·с;
 μ – кінематична в’язкість, м²/с;
 v – швидкість, м/с;
 v_w – швидкість на стінці, м/с;
 ρ – густина, кг/м³;
 τ – напруження зсуву, Па.

Основні скорочення:

ПАТ – публічне акціонерне товариство (при назві установи);

НВП – науково-виробниче підприємство (при назві установи);

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»;

ПЕНТ – поліетилен низького тиску;

ПЕВТ – поліетилен високого тиску;

ПС – полістирол.

ВСТУП

Актуальність теми. Вироби з полімерних матеріалів на цей час використовуються майже у всіх сферах людського життя та галузях виробництва. З початку 1950-их років спостерігається стійка тенденція зростання світового ринку пластмас: з 1 млн т у 1950 р. до 170 млн т у 2000 р.

Натепер світове виробництво пластмас становить порядку 250-260 млн т. До 75-80 % від усіх вироблених у світі полімерів належать до термопластичних матеріалів, решта – до реактопластів, еластомерів і термоеластопластів [1].

Середньосвітове споживання полімерів на одного мешканця в 2010 р. склало 37 кг і до 2020 р має збільшитися до 50 кг [1]. Відзначається, що сукупне споживання полімерних матеріалів на душу населення в регіонах світу зростає, в процентному відношенні, швидше сукупного валового внутрішнього продукту. Цьому сприяють нові технології полімерних матеріалів, завдяки яким розширяться області їх застосування, причому головним чином за рахунок витіснення традиційних металів, сплавів і кераміки. На початку третього тисячоліття саме така ситуація відзначається в автомобілебудуванні, аерокосмічній галузі, суднобудуванні і навіть в будівництві.

В умовах ринкової економіки та високої конкуренції найбільш важливими характеристиками будь-якого виробу є ціна виробництва та якість продукції, не виключенням є і вироби з полімерних матеріалів.

Вартість виробництва залежить від багатьох чинників: складності обладнання, технології переробки, типу сировинного матеріалу та ін. Одним з чинників, що впливають на вартість, є час та складність кінцевої доводки параметрів переробного обладнання для отримання необхідної конфігурації виробу. Незважаючи на сучасні методи числового моделювання, переробне обладнання, перед введенням у експлуатацію, потребує ітераційного доведення для отримання необхідних конфігурації та характеристик виробів, це пов'язано з тим, що полімерні матеріали мають складні фізико-механічні характеристики,

деякими з яких нехтують під час проектування переробного обладнання через недостатню вивченість деяких характеристик або значне збільшення часу розрахунку при їх врахуванні [2-10].

На якість виробу впливають характеристики сировинного матеріалу, параметри переробного обладнання та технологічні режими. При створенні обладнання та технології переробки намагаються передбачити характеристики майбутнього виробу за допомогою числового моделювання. Проте, нехтування деякими характеристиками матеріалів, по вищезгаданим причинам, призводить до значної різниці у характеристиках моделі і готового виробу [11-15].

Одною з характеристик полімерних матеріалів, якою зазвичай нехтують при числовому моделюванні є наявність пристінних ефектів різної природи, які значно впливають на точність моделювання. Найбільш істотні помилки при розрахунку каналів виникають внаслідок відсутності врахування пристінних ефектів, що мають місце при течії деяких полімерів. Пристінні ефекти можуть значною мірою впливати на розподіл основних параметрів розплаву по всьому перерізу каналів і, як наслідок, на якісні характеристики, точність розмірів та необхідність доводки обладнання [16-21]. При переробці вторинної сировини вплив пристінних ефектів особливо виражений [22]. Крім того, виникнення нестабільностей течії пов'язують саме з пристінними ефектами [23-30].

Традиційно прийнято вважати, що відносна швидкість потоку розплаву полімерного матеріалу на стінці переробного обладнання відсутня. Хоча останнім часом деякі вчені намагаються врахувати вплив пристінних ефектів при моделюванні [31-38], але при цьому не враховується природа наявності цих ефектів у матеріалі, а створюється єдиний підхід, який не у всіх випадках демонструє прийнятну збіжність з практикою.

Врахування ж природи матеріалу, його фізико-механічних властивостей та характеристик дозволяє моделювати течію такого матеріалу з урахуванням пристінних ефектів максимально точно, що значно спрощує подальше налаштування обладнання та його введення у експлуатацію [39, 40].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась згідно з держбюджетними науково-дослідними роботами НТУУ «КПІ»:

- «Розроблення високоефективних енерго- і ресурсозберігаючих технологічних засад процесів виготовлення конструкційних полімерних композиційних матеріалів» (№ 2547-п, 2012–2013 рр., № ДР 0112U000369; замовник – Міністерство освіти і науки України; автор – виконавець теми);
- «Створення технологічних засад одержання високоміцних виробів з конструкційних композиційних матеріалів для спеціального машинобудування» (№ 2714-п, 2014–2015 рр., № ДР 0114U001524; замовник – Міністерство освіти і науки України; автор – виконавець теми);
- «Науково-технічні засади проектування обладнання для формування виробів з полімерних композицій із врахуванням їх в'язкопружних властивостей» (№ 2824-п, 2015–2016 рр., № ДР 0115U000178; замовник – Міністерство освіти і науки України; автор – виконавець теми).

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є встановлення основних параметрів, необхідних для розрахунку процесів формування і конструювання формуючого обладнання для виготовлення полімерних композиційних матеріалів із врахуванням пристінних ефектів.

Відповідно до мети поставлено такі задачі:

- розробити метод визначення наявності пристінних ефектів у полімерному матеріалі та їх природи, методики визначення величини та характеру пристінних ефектів в залежності від їх природи;
- провести експериментальні дослідження величини та характеру пристінних ефектів у різних полімерних матеріалах;
- удосконалити класичну математичну модель процесу переробки полімерних матеріалів для врахування пристінних ефектів;
- провести числові дослідження впливу пристінних ефектів на параметри процесу переробки полімерних матеріалів та впливу геометричних

параметрів каналів переробного обладнання на величину впливу пристінних ефектів на процес;

- розробити рекомендації для покращення конструктивних і технологічних параметрів процесу формування на основі дослідження впливу пристінних ефектів на параметри процесу.

Об'єктом дослідження є процес течії полімерних матеріалів у каналах переробного обладнання.

Предметом дослідження є пристінні ефекти, що виникають на границі розподілу полімерний матеріал – стінка каналу переробного обладнання.

Методи дослідження. Поставлені в роботі задачі вирішувались на основі експериментальних досліджень реологічних властивостей полімерних матеріалів, сучасних методів числового моделювання з використанням положень теорії суцільного середовища, методу скінченних елементів на базі експериментально визначених фізико-механічних властивостей пристінних шарів полімерних матеріалів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:

- створено метод оцінки наявності пристінних ефектів та їх характеру, а також величини цих ефектів, що може бути застосований до будь якого матеріалу з неньютонівськими властивостями;
- на базі проведених експериментальних досліджень пристінних ефектів у полімерних матеріалах встановлені наявність, характер та величина цих ефектів для досліджуваних матеріалів;
- встановлено величину впливу геометричних параметрів типових каналів переробного обладнання на величину прояву пристінних ефектів;
- для досліджуваних матеріалів було отримано регресивні математичні моделі для врахування впливу пристінних ефектів на процес;
- встановлено межі доцільності врахування пристінних ефектів при проектуванні переробного обладнання.

Удосконалено класичну математичну модель процесу переробки полімерних матеріалів рівняннями, що дозволяють враховувати пристінні ефекти в залежності від їх характеру.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- розроблено методику проведення експериментальних досліджень пристінних ефектів;
- створено експериментальну установку для дослідження пристінних ефектів;
- проведено експериментальні дослідження пристінних ефектів у полімерних матеріалах з застосуванням змащувального агента та без нього;
- запропоновано конструктивні засоби з компенсації негативного впливу пристінних ефектів на стабільність процесу формування, на які отримано патенти України;
- науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено у промислових зразках переробного обладнання, розроблених ПАТ «НВП «Більшовик», м. Київ;
- результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ «КПІ».

Особистий внесок здобувача. Автору належить розробка методик визначення наявності пристінних ефектів, їх природи та характеру на базі експериментальних досліджень, доповнення класичної математичної моделі переробки полімерних матеріалів, розробка алгоритму врахування пристінних ефектів, розроблення методик розрахунків та проведення натурних і числових експериментів, впровадження результатів роботи.

Апробація результатів дисертації. проводилась на таких конференціях і семінарах:

- Науково-практична конференція студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенерго-ефективні процеси, технології та обладнання хімічних

виробництв і підприємств будівельних матеріалів» (Київ, 2012);

- IX міжнародна науково-практична конференція «Перспективні дослідження науки і техніки 2013» (Пшемишль, 2013);

- Всеукраїнська конференція молодих учених та студентів «Сучасні технології одержання композиційних матеріалів, хімічних волокон і нанокompозитів» (Київ, 2013);

- Науково-практична конференція студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» (Київ, 2014);

- Міжнародна науково-практична конференція «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2014» (Одеса, 2014);

- Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки» (Київ, 2015);

- Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності» (Київ, 2015);

- Всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпропетровськ, 2015).

Публікації. За темою роботи опубліковано 25 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України, з них 3 статті у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 3 патенти на корисну модель, 12 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

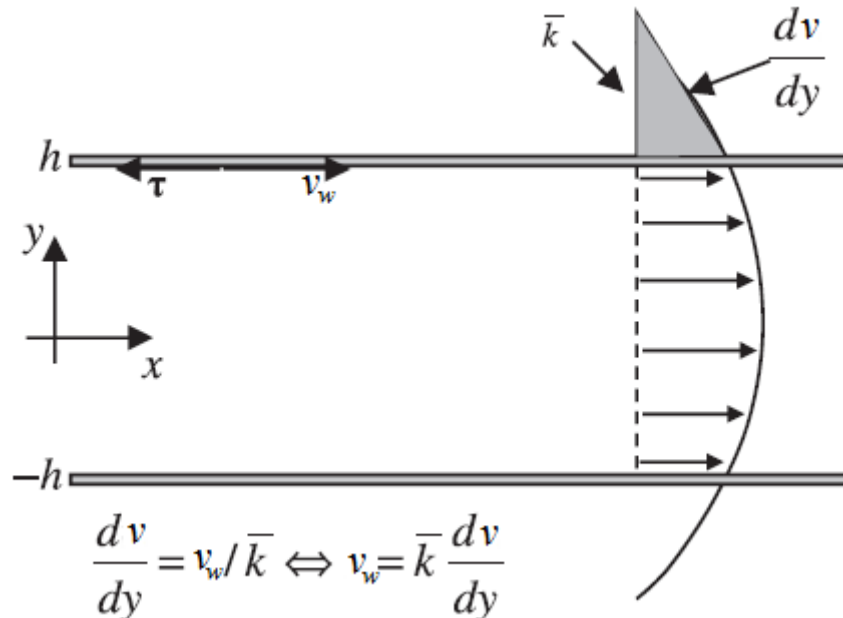
Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації представлена на 131 сторінці і містить 67 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 183 сторінки, у тому числі 3 додатки на 31 сторінці і список використаних джерел зі 129 найменувань на 15 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРУ

1.1 Огляд математичних моделей течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів

1.1.1 Модель тертя на основі узагальненої ньютонівської моделі в'язкої рідини

У працях [41-45] розглядається тертя між течією та стінкою, що створює дотичний вектор напруження τ (рис. 1), який може бути достатнім, щоб зумовити прослизання рідини. Прослизання, в свою чергу, призводить до появи ненульової швидкості уздовж стінки. Дотичний вектор напружень залежить від градієнта швидкості рідини біля стінки таким чином, що дотична швидкість і дотичний вектор напруження спрямовані в протилежні напрямки (рис. 1).



\bar{k} – коефіцієнт тертя; v – швидкість у потоці, м/с; v_w – швидкість на стінці, м/с; τ – напруження зсуву, Па; x та y – координати, спрямовані вздовж і поперек каналу

Рисунок 1.1 – Профіль швидкості потоку при умові ковзання на стінці

Нав'є [46] стверджує, що при наявності ковзання руху рідини повинна бути протиставлена сила, пропорційна відносній швидкості між рідким шаром і твердої стінкою. Рис. 1.1 ілюструє інтерпретацію ковзання, профіль швидкості по каналу і співвідношення між швидкістю і її похідною на стінці. Ця похідна на стінці має такий же нахил, як і співвідношення v/\bar{k} . Таким чином, може бути отримане співвідношення, що включає в себе швидкість ковзання

$$v_w = \bar{k} \frac{dv}{dy}. \quad (1.1)$$

Враховуючи узагальнену ньютонівську модель рідини, дотичні напруження біля стінки становитимуть

$$\tau_{xy} = \eta(\dot{\gamma}) \frac{dv}{dy},$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, s^{-1} .

Вираз (1.28) може бути переписаний з урахуванням узагальненої ньютонівської моделі

$$v_w = \text{sign}\left(\frac{dv}{dy}\right) k \tau_{xy},$$

де $k = \bar{k}/\eta(\dot{\gamma}) \geq 0$.

Цю лінійну залежність між швидкістю ковзання на стінці і напруженням зсуву на стінці називають лінійним законом ковзання Нав'є [46] або просто законом ковзання Нав'є, який широко застосовують при моделюванні течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів [47-52]. Він широко використовується для представлення експериментальних даних, як в [53-56] для течій Куетта і Пуазейля.

З метою подолання розриву між теорією і експериментальними даними були створені різні моделі ковзання, основані на залежності коефіцієнта тертя від швидкості або напруження зсуву на стінці та моделі, отримані з молекулярно-кінетичної теорії [57-59].

Нелінійний закон ковзання Нав'є [57] припускає, що коефіцієнт тертя залежить від напруження зсуву, що описується нелінійною степеневою функцією

$$v_w = \text{sign}\left(\frac{dv}{dy}\right) k |\tau_{xy}|^{m-1} \tau_{xy}, \quad (1.2)$$

де $m > 0$. При $m = 1$ закон перетворюється на лінійний закон ковзання Нав'є.

Це нелінійна модель була використана для представлення експериментальних даних для течій Куетта і Пуазейля [60, 61]. Модель забезпечує прийнятне наближення до практики, але не описує швидкість ковзання в діапазонах критичного напруження зсуву, при якому починається ковзання [58]. Для усунення цієї невідповідності, Хатзікіріакос (Hatzikiriakos) запропонував альтернативний закон ковзання на основі теорії в'язкої рідини Ейрінга, щоб забезпечити плавний перехід від відсутності ковзання до ковзання в потоці при критичних напруженнях зсуву [58].

Нехай τ_c – критичне напруження, при якому починається ковзання, а $k_1, k_2 \geq 0$, тоді закон ковзання Хатзікіріакоса

$$v_w = \begin{cases} k_1 \sinh \left[k_2 \left(\text{sign}\left(\frac{dv}{dy}\right) \tau_{xy} \right) - \tau_c \right] & , \text{ при } \tau_{xy} \geq \tau_c \\ 0 & , \text{ при } \tau_{xy} < \tau_c \end{cases} \quad (1.3)$$

Асимптотичний закон ковзання [62]

$$\tau = -\frac{1}{k_2} \left[1 - \exp\left(\frac{v}{k_1}\right) \right],$$

для одновимірного потоку вираз може бути записаний у вигляді функції швидкості ковзання

$$v_w = k_1 \ln \left[1 + k_2 \left(\operatorname{sign} \left(\frac{dv}{dy} \right) \tau_{xy} \right) \right]. \quad (1.4)$$

Для асимптотичного закону ковзання та закону Хатзікіріакоса коефіцієнти k_1 і k_2 дозволяють співставити величину ковзання і форму кривої залежності напруження зсуву від швидкості на стінці з отриманими експериментальними даними.

Для течій Пуазейля і Куетта, зображених на рис. 1.2, граничні умови ковзання можна записати в загальному вигляді як для «верхньої» ($+h$), так і для «нижньої» ($-h$) стінки.

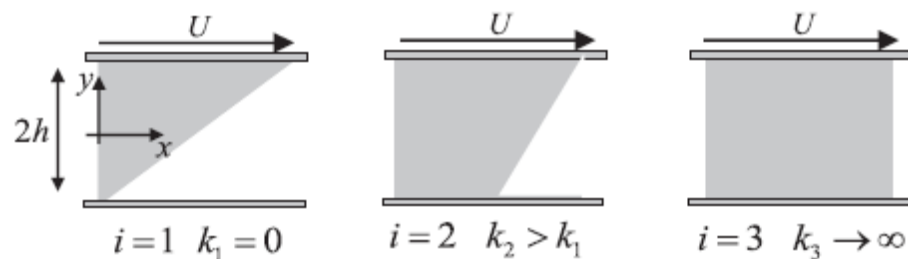


Рисунок 1.2 – Профілі швидкості потоку при різних коефіцієнтах тертя

Рівняння імпульсу

$$\frac{d}{dy} \left(\eta(\dot{\gamma}) \frac{dv}{dy} \right) = \frac{dp}{dx},$$

де p – імпульс, кг·м/с.

Інтегруючи рівняння імпульсу

$$\tau_{xy} = p_x y + C, \quad (1.5)$$

де C – константа інтегрування.

Об'єднавши рівняння (1.5) з рівняннями (1.2, 1.3, 1.4) для всіх досліджених законів ковзання можливо виразити загальний вигляд граничних умов на верхній і нижній стінках.

Для нелінійного закону ковзання Нав'є ($m=1$ для лінійного закону ковзання Нав'є)

$$\begin{aligned}v(h) &= k_1 (-p_x h - C)^m, \\v(-h) &= k_2 (-p_x h + C)^m.\end{aligned}$$

Для закону ковзання Хатзікіріакоса

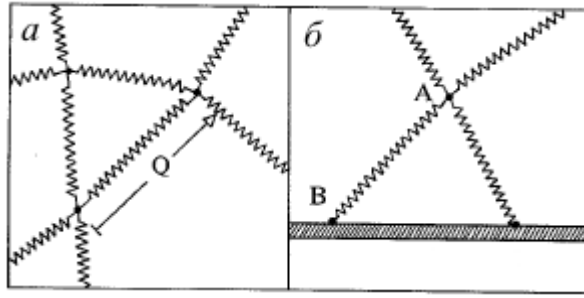
$$\begin{aligned}v(h) &= k_1 \sinh[k_2 (-p_x h - C)], \\v(-h) &= k_3 \sinh[k_4 (-p_x h + C)].\end{aligned}$$

Для асимптотичного закону ковзання

$$\begin{aligned}v(h) &= k_1 \ln[1 + k_2 (-p_x h - C)], \\v(-h) &= k_3 \ln[1 + k_4 (-p_x h + C)].\end{aligned}$$

1.1.2 Модель тертя на основі кінетичної теорії

Автори [63] описують реологічні властивості концентрованих полімерних розчинів і розплавів за допомогою підходу, який виходить з теорії пружності каучуку. Вважається, що каучуки складаються з ниток, які постійно зшиті у точках з'єднання. Для полімерних розплавів такі нитки зшиваються тимчасово. Таким чином, у полімерних сітках вузли розриваються і з'єднуються безперервно. На рис. 1.3 показана ідеалізована модель, що складається з полімерних сегментів, тимчасово зшитих між собою. Вектори Q визначають розмір і орієнтацію окремих сегментів мережі.



a – ідеалізована полімерна сітка; b – полімерна сітка на поверхні розділу з твердою стінкою

Рисунок 1.3 – Ідеалізована модель

Рівняння конвекції в кінетичній теорії для полімерних розчинів і розплавів

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{\partial}{\partial Q} \cdot (\chi \cdot Q\psi) = \hat{g} - \hat{h}, \quad (1.6)$$

де χ – градієнт тензора швидкості;

ψ – функція розподілу конфігурації векторів Q , \hat{g} та \hat{h} , що представляють собою швидкості зшивання і розриву полімерних сегментів.

Швидкість розриву \hat{h} пропорційна функції розподілу конфігурації ψ , з константою пропорційності $h(Q)$, а швидкість зшивання \hat{g} пропорційна рівноважній функції розподілу ψ_0 , з константою постійною пропорційності $g(Q)$. Таким чином, можна записати

$$\hat{h}(Q, t) = h(Q)\psi(Q, t), \quad (1.7)$$

та

$$\hat{g}(Q, t) = g(Q)\psi_0(Q). \quad (1.8)$$

Враховуючи рівняння (1.7) та (1.8), можна записати (1.6) як

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial Q} \cdot (k \cdot Q \psi) = h(Q)(\psi_0 - \psi).$$

Рівноважна функція розподілу ψ_0 зводиться до розподілу Гаусса

$$\psi_0(Q) = \frac{\eta_0}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2\sigma^2}\right).$$

Значення компонентів Q дорівнюють нулю в рівновазі. В результаті відхилення σ^2 стає рівним третині середньоквадратичної рівноважної довжини сегментів.

Для кількісної оцінки швидкості розриву зв'язків, був запропонований вираз

$$h(Q) = \frac{1}{\lambda_0} \left[1 + \log \left(1 + \varepsilon \frac{Q^2}{\sigma^2} \right) \right].$$

Однак, щоб підрахувати, скільки втрачених сегментів руйнуються через прилипання до стінки (що необхідно для розрахунків швидкості ковзання), запропоновано наступне рівняння

$$h'(Q) = \frac{1}{\lambda_0} \left[1 + \log \left(1 + \varepsilon \frac{(\|Q\| - Q^*)^2}{\sigma^2} \right) \right],$$

де $\|Q\|$ – величина Q , а Q^* (скаляр) – критична довжина, вище якої натяг нитки здатен подолати роботу адгезії.

Для розрахунку швидкості ковзання, запропоновано наступний вираз

$$v_w = n'_0 \sigma^2 \langle n \cdot (k \cdot Q) t_h \rangle,$$

де n – вектор паралельний напрямку потоку;

t_h – час зависання кожного зламаного ланцюга (час, що минув між разривом та створенням нового зв'язку).

1.1.3 Анізотропна модель тертя

У роботі [64] автором пропонується модель ковзання, отримана з кінетичної теорії для полімеру, та пружної моделі [65]. Конформації молекули, прикріпленої до стінки знаходяться в рівновазі між дією зовнішніх сил і силою пружності

$$\zeta \left(v_w - \frac{dR}{dt} \right) - \frac{3k_B T}{a^2} R = 0, \quad (1.9)$$

де $R = (X, Y)$ – вектор орієнтації молекули;

ζ – тензор тертя;

k_B – стала Больцмана;

T – абсолютна температура;

a – характерний розмір молекули в стані рівноваги.

Ярин (Yarin) і Грехем (Graham) [65] припускали, що тензор тертя ізотропний, тобто, $\zeta = \zeta_0 \delta$, де δ – одиничний тензор. Проте, якщо тензор тертя анізотропний і задається формулою Джисекуса (Gissekus) [66], $\zeta^{-1} = 1/\zeta_0 (\delta + \rho \tau)$, то рівняння (1.9) можна записати в компонентній формі

$$\begin{aligned} v_w - \frac{dX}{dt} - \frac{3kT}{a^2 \zeta_0} (X + \rho \tau_{xx} X + \rho \tau_{yx} Y) &= 0, \\ \frac{dY}{dt} + \frac{3kT}{a^2 \zeta_0} (Y + \rho \tau_{yx} X + \rho \tau_{yy} Y) &= 0. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Змінна X пов'язана з напруженням зсуву за законом Гука, $\tau_{yx}/n = HX$, де $H = 3kT/a^2$ – жорсткість пружини, а n – щільність молекул. Для спрощення

припускається, що молекули міцно прикріплені, тому n є константою, тоді рівняння (1.10) може бути вирішене в стійкому стані

$$v_s = \frac{1}{\zeta_0 n} \left[\frac{(1 + \rho \tau_{xx})(1 + \rho \tau_{yy}) - \rho^2 \tau_{yx}^2}{(1 + \rho \tau_{yy})} \right] \tau_{yx}.$$

При $\rho = 0$ квазістаціонарне наближення зменшує анізотропну складову моделі до закону ковзання Нав'є. Дана модель аналогічна статичній моделі ковзання Ярина-Грехема [65], за винятком того, що швидкість тут залежить від всіх компонентів напруження зсуву, а не тільки від нормальних напружень.

Розглянуті моделі дозволяють досить точно описати пристінні ефекти при течії полімерного матеріалу по каналу, проте вони не враховують природу та характер виникнення пристінних ефектів у різних матеріалах, а застосовують загальний підхід.

1.2 Огляд методик визначення величини пристінних ефектів в полімерних матеріалах

1.2.1 Аналітичний метод розв'язання задачі течії рідини в приграничному шарі

Задача про розподіл швидкості й опір при ламінарній течії, що стабілізувалася, середовища по прямій горизонтальній круглій трубі може бути вирішена аналітично [16, 67].

Задача про розподіл швидкості полягає в такому. Рух середовища по трубі радіуса R відбувається під дією перепаду тиску. Можна вважати, що тиск у кожному перетині перпендикулярному осі труби, постійний й змінюється тільки в напрямку течії, причому $\frac{\partial P}{\partial x} = \text{const}$. Тоді швидкість середовища буде змінюватися тільки в одному напрямку – перпендикулярному течії.

Автори отримали рівняння:

$$\Delta P = 8\mu l \frac{\bar{u}}{R^2}, \quad (1.11)$$

де μ – кінематична в'язкість;

l – довжина каналу.

Рівняння (1.11) установлює, що перепад тиску пропорційний першій ступені середньої швидкості.

В результаті приведення рівняння (1.11) до безрозмірного вигляду автори одержують:

$$\zeta = \frac{64}{\text{Re}_d}. \quad (1.12)$$

Закон опору, виражений формулою (1.12), добре підтверджується досвідом.

У потоці можливі лише динамічні зміни, що виникають у результаті дії сил в'язкості і, що приводять до утворення швидкісного профілю. Для цього завдання рівняння приграничного шару приймають вид

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Таким чином, вигляд функції (1.13) для ламінарної стабілізованої течії в круглій трубі, може бути знайдений аналітично.

1.2.2 Метод визначення в'язкосних властивостей розплаву й впливу стінки на ці властивості

При течії поліетилену й деяких інших полімерів у циліндричних каналах можуть мати місце пристінні ефекти, які звичайно проявляються в неінваріантності кривих течії відносно діаметра каналу. Пристінні ефекти при течії поліетилену експериментально виявляються за величини радіуса каналу, більшої деякої граничної величини. Вони можуть бути пояснені виникненням аномального шару в стінці каналу з в'язкістю, що відрізняється від в'язкості матеріалу поза цим шаром.

Наявність аномального шару можна пояснити впливом стінки на процеси структурування в потоці розплаву полімеру, що, крім напруження зсуву, є додатковим чинником, що впливає на в'язкість розплаву. Найбільшу кількість досліджень пристінного шару здійснювали для поліетиленів [68-72].

Для опису аномальної поведінки поліетилену може бути запропоновано декілька реологічних моделей. Спочатку розглянемо найбільш просту з них – модель двошарової рідини [73, 74].

Для круглого циліндричного каналу швидкість потоку двошарової рідини, одна з яких тече в пристінному шарі товщиною b , а інша займає центр потоку, може бути виражена рівнянням

$$U(r) = \int_{a-y}^a g(\tau) dr - \int_r^{a-b} f(\tau) dr,$$

де $U(r)$ – швидкість у точці каналу з радіальною координатою r ;

r – радіальна координата;

a – радіус каналу;

τ – напруження зсуву в точці каналу з координатою r ;

b – товщина шару рідини, що тече біля стінки каналу;

y – відстань від стінки, $g \leq b$.

Витрати визначаються:

$$U(r) = \int_{a-y}^a g(\tau) dr - \int_r^{a-b} f(\tau) dr,$$

або

$$Q = 2\pi \int_0^a \left[\int_{a-y}^a g(\tau) dr + \int_r^{a-b} f(\tau) dr \right] dr. \quad (1.14)$$

Після інтегрування по частинам, при $b = a$, $Q = 0$ автори отримують рівняння рівняння

$$\frac{Q}{\pi a^3} \tau_a^3 = \frac{Q_2}{\pi a^3} \tau_a^3 = \int_0^{\tau_a} g(\tau) d\tau.$$

При цьому криві течії стають інваріантними. Збільшення радіуса каналу супроводжується відносним зменшенням витрати рідини, що тече біля його стінок.

Опис аномальних властивостей потоку поліетилену виконаний авторами [73], виходячи із припущення про те, що на деякій відстані від стінки градієнт швидкості зсуву визначається не тільки прикладеною величиною напруження зсуву, але й деяким фактором, що залежить від впливу стінки на процеси структурування в потоці й повністю загасаючим на деякій відстані від стінки. Для цього випадку градієнт швидкості зсуву може бути визначений рівнянням

$$\frac{dU}{dy} = -f(\tau) - \psi(\tau, y), \quad (1.15)$$

де y – відстань від стінки каналу.

Якщо $y \geq b$, то $\psi(\tau, y) \equiv 0$.

Умова (1.15) дозволяє визначити профіль швидкостей у круглому каналі у вигляді співвідношення

$$U(r) = -\int_r^a f(\tau) d\tau - \int_r^a \psi(\tau, y) d\tau. \quad (1.16)$$

Для круглого каналу $y = a - r$.

Якщо $a - r \geq b$, то $\int_r^a \psi(\tau, y) d\tau \equiv 0$.

Припускаючи, що функція

$$\psi(\tau, y) = \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right), \quad (1.17)$$

та підставляючи вираз (1.17) у рівняння (1.16) і інтегруючи по частинам з наступною заміною змінних:

$$\begin{aligned} Q = & \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau + (a-b)^2 \frac{a}{\tau_a \left(\frac{a-b}{a}\right)^{\tau_a}} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)^{\tau_a}}^{\tau_a} \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau + \\ & + \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)^{\tau_a}}^{\tau_a} \tau^2 \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Розглянуто два окремі випадки рівняння (1.18). При $b = 0$:

$$Q = \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau. \quad (1.19)$$

При цьому криві течії будуть інваріантні й рідина буде мати неньютоновські властивості. Рівняння (1.19) приблизно виконується й для $a \square b$. Якщо $b = a$:

$$Q = \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \left[\int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau + (a-b)^2 \frac{a}{\tau_a} \int_0^{\tau_a} \tau^2 \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau \right].$$

З огляду на рівняння (1.18), можна записати:

$$s\left(\frac{y}{b}\right) = s\left(\frac{a - \frac{a}{\tau_a}\tau}{a}\right) = s\left(1 - \frac{\tau}{\tau_a}\right) = s(\tau).$$

Звідси треба, щоб при $b = a$ криві течії визначатися тільки прикладеними напруженнями зсуву й не будуть залежати від діаметра каналу.

Функція $s\left(\frac{y}{b}\right)$ повинна підкорятися наступним умовам:

$$\begin{aligned} s\left(\frac{y}{b}\right) &= 1 && \text{при } y = 0, \\ s\left(\frac{y}{b}\right) &\equiv 0 && \text{при } y \square b. \end{aligned}$$

Найбільш проста залежність, що задовольняє цим умовам:

$$s\left(\frac{y}{b}\right) = \frac{b - y}{b},$$

що еквівалентно співвідношенню

$$s\left(\frac{y}{b}\right) = \frac{b - y}{b} = \frac{c\left(b - a + \frac{a}{\tau_a}\tau\right)}{a}. \quad (1.20)$$

Вираз (1.18), після перетворення:

$$\frac{Q}{\pi a^3} \tau_a^3 = \int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau + \frac{\tau_a^2}{a^2} (a - b)^2 \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau + \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \tau^2 \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau.$$

Підставляючи умову (1.20) у рівняння (1.18) і диференціюючи по τ_a :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\pi a^3} \left[\tau_a \frac{dQ}{d\tau_a} + 3Q \right] = f(\tau_a) + c\varphi(\tau_a) \left[1 - \left(\frac{a-b}{a} \right) + \left(\frac{a-b}{a} \right)^2 - \left(\frac{a-b}{a} \right)^3 \right] - \\ - \frac{2c(a-b)^3}{a^3 \tau_a} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \varphi(\tau) d\tau + \frac{c(a-b)^2}{a^2 \tau_a^2} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \tau \varphi(\tau) d\tau - \frac{c}{\tau_a^4} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \tau^3 g(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Аналіз рівняння (1.21) показує, що величина градієнта швидкості зсуву на стінці каналу, обумовлена тільки напруженнями зсуву, може бути приблизно визначена шляхом експериментів, проведених на каналах більших діаметрів. Для більших діаметрів рівняння (1.21) перетвориться наступним чином:

$$\frac{1}{\pi a^3} \left[\tau_a \frac{dQ}{d\tau_a} + 3Q \right] = f(\tau_a),$$

а нахил кривих течії може бути визначений по формулі

$$\frac{4Q}{\pi a^3} \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right) = f(\tau_a),$$

де

$$\frac{1}{n'} = \frac{d \ln \left(\frac{4Q}{\pi a^3} \right)}{d \ln \tau_a}.$$

Таким чином, на більших діаметрах неінваріантність кривих течії експериментально визначити неможливо, оскільки вони несуттєво будуть відрізнятися одна від одної, прагнучи до загальної кривої.

Зі зменшенням діаметра каналу настає момент, коли починає виконуватися умова $b = a$. При цьому рівняння (1.21) перетвориться так:

$$\frac{1}{\pi a^3} \left[\tau_a \frac{dQ}{d\tau_a} + 3Q \right] = f(\tau_a) + \varphi(\tau_a) - \frac{c}{\tau_a^4} \int_0^{\tau_a} \tau^3 \varphi(\tau) d\tau.$$

Ввівши змінну

$$T = \frac{4Q}{\pi a^3},$$

з урахуванням якої:

$$\left(\frac{3}{4}T + \frac{\tau_a}{4} \frac{dT}{d\tau_a} \right) = f(\tau_a) + \varphi(\tau_a) - \frac{1}{\tau_a^4} \int_0^{\tau_a} \tau^3 \varphi(\tau) d\tau. \quad (1.22)$$

З рівняння (1.22) видно, що крива течії визначається тільки напруженнями зсуву незалежно від діаметра каналу, тобто є інваріантною. Нахил кривої течії може бути знайдений по формулі

$$\frac{4Q}{\pi a^3} \left(\frac{3k' + 1}{4k'} \right) = f(\tau_a) + \varphi(\tau_a) - \frac{1}{\tau_a^4} \int_0^{\tau_a} \tau^3 \varphi(\tau) d\tau. \quad (1.23)$$

У рівнянні (1.23) k' – величина, аналогічна за формою запису величині n' , але визначена на малих діаметрах.

Запропонована модель рідини, для якої на деякій відстані від стінки в'язкісні властивості не визначаються тільки одною напруженням зсуву при величині цієї відстані в межах від нуля до радіуса каналу, дозволяє описати аномальні властивості розплаву поліетилену більш точно, ніж модель двошарової рідини.

Проте, розглянуті методи не дозволяють визначити природу пристінних ефектів та дозволяють визначити величину ефекту не в усьому діапазоні перерізів каналів.

1.2.3 Дослідження профілю швидкостей при течії розплаву в циліндричних каналах

При експериментальному дослідженні потоку розплаву полімеру часто застосовують метод спостереження за переміщенням міток. Кількісне визначення швидкостей звичайно пов'язане з використанням прозорих корпусів

каналів, що обмежує діапазон досліджуваних температур і тисків. Для дослідження профілю швидкостей розплаву поліетилену було застосоване створення міток імпульсним введенням підфарбованого матеріалу.

Дослідження [75] проводилися на установці, призначеної для вивчення опору каналів при течії розплавів полімерів. Установка (рис. 1.4) була обладнана пристроєм для упорскування пофарбованого матеріалу. Упорскування виконувалося за допомогою штока 17, що приводиться в рух гідросистемою 19, аналогічній гідросистемі 3, використаної для привода основного плунжера.

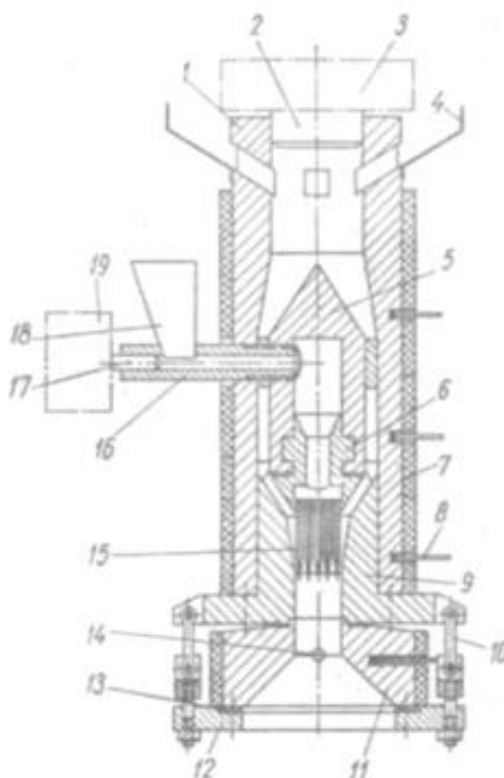


Рисунок 1.4 – Схематичний розріз установки для дослідження профілю швидкостей

Підфарбований матеріал захоплювався штоком з бункера 18 і через циліндр 16, пустотілу торпеду 5, насадку 6 і сопла 15 з отворами діаметром 0,5 мм впорскувався в основний потік на різних відстанях від стінки каналу на ділянці з розвиненим профілем швидкостей. Інтервали між упорскуваннями змінювалися від 3 до 25 с за допомогою реле рахунку імпульсів, що управляє

через виконавче реле електромагнітом золотникового гідророзподільника. Дросельний пристрій забезпечував необхідну швидкість упорскування. При інтервалах часу між упорскуваннями більше 25 с керування упорскуванням здійснювалось вручну.

У момент упорскування із сопла видавлювалися частки підфарбованого матеріалу, які захоплювалися основним потоком. Частота упорскування вибиралася таким чином, щоб на одній траєкторії виявлялося не менш трьох підфарбованих часток-міток. Наприкінці ходу основного плунжера 2 канал перекривався засувкою.

Замір відстаней між мітками виконувався безпосередньо після розбирання корпусу каналу до охолодження розплаву. Швидкість руху визначалася, як частка від розподілу відстані між двома сусідніми мітками, розташованими в потоці, віднесена до часу між їх утворенням.

Опір каналу визначався по величині зусилля, переданого через плиту 12, на якій був установлений корпус каналу 11, і тяги на пластинки тензодатчиків 10. Одночасно плунжерні датчики тиску вимірювали перепад тиску в трьох точках по довжині каналу.

Проведені експерименти з ПЕНТ показали, що у процесі течії проявляють аномальні пристінні ефекти. Ці ефекти пояснюють як наявністю постійного або періодичного проковзування матеріалу по стінці каналу або по шару матеріалу, нерухливого відносно стінки, так і існуванням пристінного шару зі зниженою в'язкістю, обумовленою додатковою орієнтацією, надаваною стінкою, або молекулярним фракціонуванням у процесі течії.

Зниження в'язкості в пристінному шарі можна пояснити переважним руйнуванням структур на границі зі стінкою. Оскільки ці ефекти проявляються в безпосередній близькості від стінки, то при досить малій величині відносно товщини шару, у якому помітно проявляється їхня дія, до радіуса каналу можна вважати, що вони діють безпосередньо на стінці, і виражати їх через ефективну

швидкість ковзання, що при наявності дійсного ковзання буде дорівнювати швидкості ковзання.

Проведені експерименти підтвердили наявність пристінних ефектів, що мають великий вплив на процес течії й характер потоку розплаву полімеру. Їх врахування дозволить усунути погрішності при побудові й використанні кривих течії. Проте, розглянуті методи не дозволяють використати отримані дані для числового розрахунку з використанням систем автоматизованого проектування.

1.2.4 Метод врахування пристінних ефектів при ковзанні розплаву по стінці каналу

У практиці розрахунку каналів головок черв'ячних машин важливе місце займає розрахунок круглих і плоскощілинних каналів [32, 76-80]. Круглі циліндричні канали зручні для проведення реологічних досліджень, а до плоскощілинних каналів при розрахунку умовно приводять канали більш складних форм, наприклад, щілини змінної висоти, кільцеві циліндричні й кільцеві конічні канали.

До пристінних ефектів, у першу чергу, варто віднести ковзання матеріалу по границі розподілення зі стінкою каналу [49, 81-84].

Пристінні ефекти можуть полягати також в утворенні в безпосередній близькості від стінки каналу шару з аномально зниженою в'язкістю або в ковзанні матеріалу по тонкому шару змащувальної речовини [85, 86]. В останніх двох випадках звичайно можна вважати, що на стінці каналу є ефективна швидкість ковзання, що залежить від напруження зсуву на стінці й фактично рівна збільшенню швидкості потоку в пристінному аномальному шарі або в шарі змащення [87-89]. Це спрощення багато в чому збігається з відомим підходом до опису течії дисперсних систем. У випадку, коли товщина аномального пристінного шару дорівнює нулю, ефективна швидкість ковзання збігається зі швидкістю ковзання по границі контакту зі стінкою каналу [90].

Розглядаючи течію матеріалу в круглому циліндричному каналі при наявності ковзання на стінці каналу. Швидкість потоку v_r , у точці круглого циліндричного каналу з радіальною координатою r може бути виражена рівнянням

$$v_r = - \int_r^R f(\tau) dr - S(\tau_r), \quad (1.24)$$

де $f(\tau)$ – функція, що залежить від напруження зсуву;

τ_r – напруження зсуву на стінці каналу;

$S(\tau_r)$ – швидкість ковзання на стінці каналу.

Величина витрати по звичайній формулі для циліндричного каналу:

$$Q = 2\pi \int_0^R r v_r dr. \quad (1.25)$$

Підставивши рівняння (1.24) у формулу (1.25) та виконавши інтегрування в роздільності і зробивши заміну змінних з використанням співвідношення, справедливого для круглого каналу

$$\tau = \frac{r}{R} \tau_r,$$

після перетворення:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{S(\tau_r)}{R} + \frac{1}{\tau_r^3} \int_0^{\tau_r} \tau^2 f(\tau) d\tau. \quad (1.26)$$

Продиференціювавши рівняння (1.26) по напруженню зсуву на стінці каналу:

$$f(\tau_r) = \frac{1}{\pi R^3} \left[\tau_r \frac{dQ}{d\tau_r} + 3Q \right] - \frac{1}{R} \left\{ \tau_r \frac{d[S(\tau_r)]}{d\tau_r} + 3S(\tau_r) \right\}.$$

Використовуючи поняття логарифмічної похідної й уводячи позначення:

$$\Gamma = \frac{4Q}{\pi R^3},$$

$$\frac{d \ln \Gamma}{d \ln \tau_R} = \frac{1}{n'},$$

та

$$\frac{d \ln [S(\tau_R)]}{d \ln \tau_R} = \frac{1}{k'},$$

таким чином:

$$f(\tau_R) = \Gamma \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right) - \frac{S(\tau_R)}{R} \left(\frac{3k' + 1}{k'} \right). \quad (1.27)$$

Величина $f(\tau_R)$ є градієнтом швидкості зсуву на стінці каналу, а n' і k' – тангенси кутів нахилу логарифмічних кривих залежності напруження зсуву на стінці каналу відповідно від ефективного градієнта швидкості зсуву й від швидкості ковзання на стінці каналу.

Особливий інтерес представляє питання про знаходження опору каналів при наявності пристінних ефектів за відомими реологічними характеристиками полімерних матеріалів [91-95]. Для розрахунків опору каналів головок черв'ячних машин найбільш зручно використовувати реологічні характеристики, отримані методом капілярної віскозиметрії, тобто на круглих каналах. Тому врахування пристінних ефектів при розрахунку опору круглих каналів найбільше просто може бути зроблено шляхом використання кривої течії, отриманої на каналі, діаметр якого дорівнює діаметру каналу, що розраховується. Цей метод припускає попереднє визначення реологічних характеристик полімерів на каналах різних діаметрів і використання інтерполяції, проте, при такому підході втрачається універсальний характер врахування властивостей.

1.2.5 Метод Муні

Для дослідження тертя рідини по твердій стінці у розплаві також застосовують метод Муні [31, 96]. У основу цього методу покладено припущення, що коли рідина не прилипає до стінок, швидкість рідини на стінці створює більш високу об'ємну витрату Q , порівняно з повним прилипанням до стінок. Середня швидкість потоку, що безпосередньо може бути виміряна

$$v_{\text{сер}} = \frac{Q}{\pi R^2}. \quad (1.28)$$

Середня швидкість потоку $v_{\text{сер}}$ пов'язана з істинною середньою швидкістю $v_{\text{іст}}$ через швидкість ковзання $v_{\text{ковз}}$

$$v_{\text{іст}} = v_{\text{сер}} - v_{\text{ковз}}.$$

Помноживши на $4/R$, знаходиться зв'язок між істинною швидкістю зсуву і середньою швидкістю зсуву

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_{\text{сер}} &= \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4v_{\text{сер}}}{R}, \\ \dot{\gamma}_{\text{іст}} &= \dot{\gamma}_{\text{сер}} - \dot{\gamma}_{\text{ковз}}, \\ \frac{4v_{\text{іст}}}{R} &= \frac{4v_{\text{сер}}}{R} - \frac{4v_{\text{ковз}}}{R}. \end{aligned} \quad (1.29)$$

Підставивши (1.28) у (1.29)

$$\frac{4Q}{\pi R^3} = 4v_{\text{ковз}} \frac{1}{R} + \frac{4v_{\text{іст}}}{R}.$$

При побудові графіку $\frac{4Q}{\pi R^3}$ від $1/R$ отримується лінія з тангенсом куту нахилу, рівним чотирьом швидкостям ковзання.

Недоліком методу Муні є відсутність врахування при розрахунку

неньютонівського характеру течії розплаву полімеру.

1.2.6 Поправка Рабіновича

Для врахування ньютонівського характеру течії розплаву полімеру використовують поправку Рабіновича [97].

На площі поперечного перетину циліндричного каналу виділяється елементарне кільце з "поточним" радіусом r товщиною dr . Елементарна площа такого кільця дорівнює:

$$dS(r) = 2\pi r dr. \quad (1.30)$$

Введемо термін «безрозмірний» радіус

$$\beta = \frac{r}{r_w}, \quad (1.31)$$

де r – поточний радіус,

r_w – радіус стінки каналу.

Перетворюючи (1.31)

$$r = r_w \beta; \quad dr = r_w d\beta. \quad (1.32)$$

Підставляючи (1.32) в (1.30)

$$dS(\beta) = 2\pi r_w^2 \beta d\beta. \quad (1.33)$$

Елементарна об'ємна витрата рідини через кільце дорівнює:

$$dq(\beta) = dS(\beta) \cdot V(\beta). \quad (1.34)$$

Враховуючи, що при течії ступеневої рідини в циліндричному каналі, швидкість течії на безрозмірному радіусі

$$V(\beta) = V_{\max} \left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}} \right). \quad (1.35)$$

Підставляючи (1.33) та (1.35) в (1.34)

$$dq(\beta) = 2\pi r_w^2 \beta d\beta \cdot V_{\max} \left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}} \right). \quad (1.36)$$

Враховуючи, що при течії степеневі рідини в циліндричному каналі, максимальна швидкість течії по центру каналу

$$V_{\max} = \frac{n}{n+1} r_w \dot{\gamma}_w. \quad (1.37)$$

Підставляючи (1.37) в (1.36)

$$dq(\beta) = 2\pi r_w^2 \beta d\beta \cdot \frac{n}{n+1} r_w \dot{\gamma}_w \left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}} \right).$$

Перетворюючи

$$dq(\beta) = 2\pi \frac{n}{n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w \left(\beta d\beta - \beta^{\frac{n+1}{n}} d\beta \right).$$

Інтегруючи в межах від 0 до 1

$$q = 2\pi \frac{n}{n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w \left(\int_0^1 \beta d\beta - \int_0^1 \beta^{\frac{2n+1}{n}} d\beta \right).$$

Після інтегрування:

$$q = 2\pi \frac{n}{n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w \frac{n+1}{2(3n+1)} = \pi \frac{n}{3n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w.$$

Перетворивши відносно швидкості зсуву

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3n+1}{4n} \frac{4q}{\pi r_w^3}. \quad (1.38)$$

Комплекс

$$R = \frac{3n+1}{4n}.$$

називається поправкою Рабіновича.

При $n=1$ для ньютонівської рідини $R=1$ і вираз (1.38) перетворюється в формулу для розрахунку швидкості зсуву на стінці каналу:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4q}{\pi r_w^3}.$$

Поправка Рабіновича враховує збільшення швидкості зсуву на стінці каналу в результаті "притуплення" профіля швидкостей для степеневих рідин.

1.3 Висновки і завдання досліджень

Проведений огляд показав, що раніше розглядалися окремі питання пристінних ефектів при течії розплаву полімеру, проте вони мають ряд недоліків:

- розглянуті моделі дозволяють досить точно описати пристінні ефекти при течії полімерного матеріалу по каналу, проте вони не враховують природу та характер виникнення пристінних ефектів у різних матеріалах, а застосовують загальний підхід
- розглянуті методи не дозволяють визначити природу пристінних ефектів та дозволяють визначити величину ефекту не в усьому діапазоні перерізів каналів;
- розглянуті методи не дозволяють використати отримані дані для числового розрахунку з використанням систем автоматизованого проектування;

- при підході до розрахунку з використанням розглянутих методів втрачається універсальний характер врахування властивостей пристінних шарів;
- недоліком методу Муні є відсутність врахування неньютонівського характеру течії розплаву полімеру при розрахунку швидкості на стінці.

Таким чином, відсутній комплексний універсальний підхід до визначення характеру та величини пристінних ефектів і можливості використання цих даних для подальшого числового моделювання.

За результатами огляду сучасного стану досліджень процесів течії полімеру було зроблено доповіді на науково-практичній конференції [98, 99].

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Дослідно-експериментальна установка

Для проведення досліду була застосована експериментальна установка на базі капілярного віскозиметра типу ПРТ-3 (рис. 2.1). Він складається із опорної плити 1, стійки 2, кронштейна 3, штурвала 4, гвинта 5, вантажу 6, поршня з тримачем 7, нагрівної ємності 8 та дзеркала 9.

Установка призначена для нагрівання і видавлювання матеріалу та для проведення замірів продуктивності. На опорній плиті 1 кріпиться колона 2, у верхній частині якої закріплено кронштейн 3, а в нижній – нагрівна ємність 8. На вільному кінці кронштейна 3 змонтовано видавлювальний пристрій, який складається з гвинта 5 і штурвала 4. При обертанні штурвала гвинт рухається поступально.

Видавлювання матеріалу забезпечується поршнем з тримачем вантажів 7, на якому розташовують вантажі 6 необхідної маси.

У вимірювальний комплект також входять мідні поршні для трамбування матеріалу та очищення каналу, рівень для установки приладу у вертикальне положення.

В свою чергу, нагрівна ємність, зображена на рис. 2.2 складається із накладок 1, 6, 15, кришки 2, склотканини 3, циліндра 4, прокладки 5, нагрівника 7, термометра опору 8, шайб 9, 19, ексцентрика 10, каліброваного сопла 11, корпусу вимірювального каналу 12, затвору 13, пластин 14, 20, захисного екрану 16, скловати 17, гвинтової стяжки 18 та корпусу головки 21.

Циліндр 4 з випробувальним каналом розташований у мідному корпусі 12 і утримується в ньому за рахунок конусності. У нижній частині каналу знаходиться змінне вимірювальне каліброване сопло (капіляр) 11, яке утримується затвором 13. За допомогою ексцентрика 10 затвор 13 переміщують, звільняючи сопло. Прогрів каналу до необхідної температури

забезпечується електронагрівником 7, а контроль температури – термопарою 8. Захисний екран 16, шайби 9 і 19 служать для зменшення втрат теплоти. Корпус з нагрівником і захисним екраном закріплений між пластинами 14 і 20 гвинтовими стяжками. Теплова ізоляція забезпечується накладками 1, 6, 15 і скловатою 17, розташованою в корпусі головки 21.

Температура в каналі регулюється автоматичним регулятором температури, змонтованим в окремому корпусі.

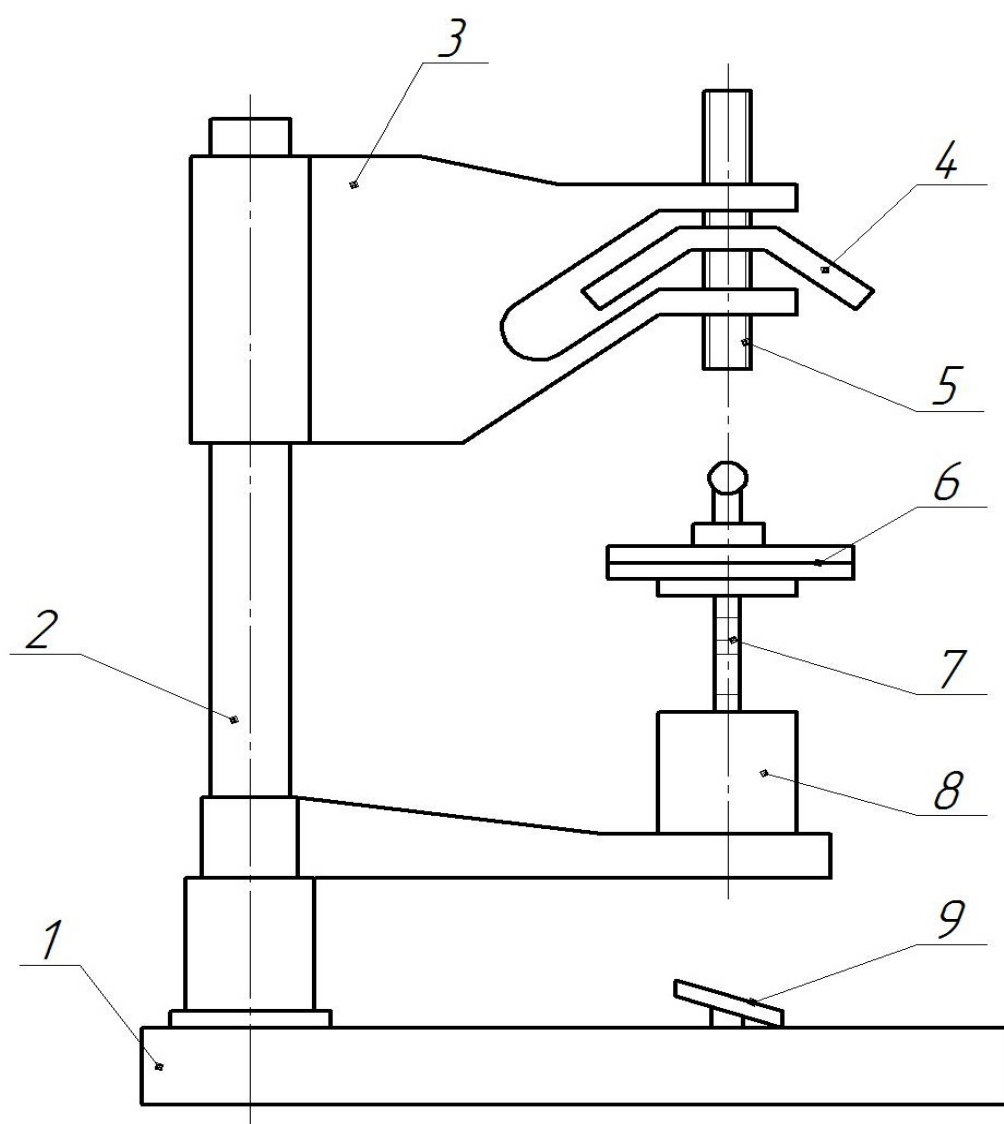


Рисунок 2.1 – Експериментальна установка (пояснення в тексті)

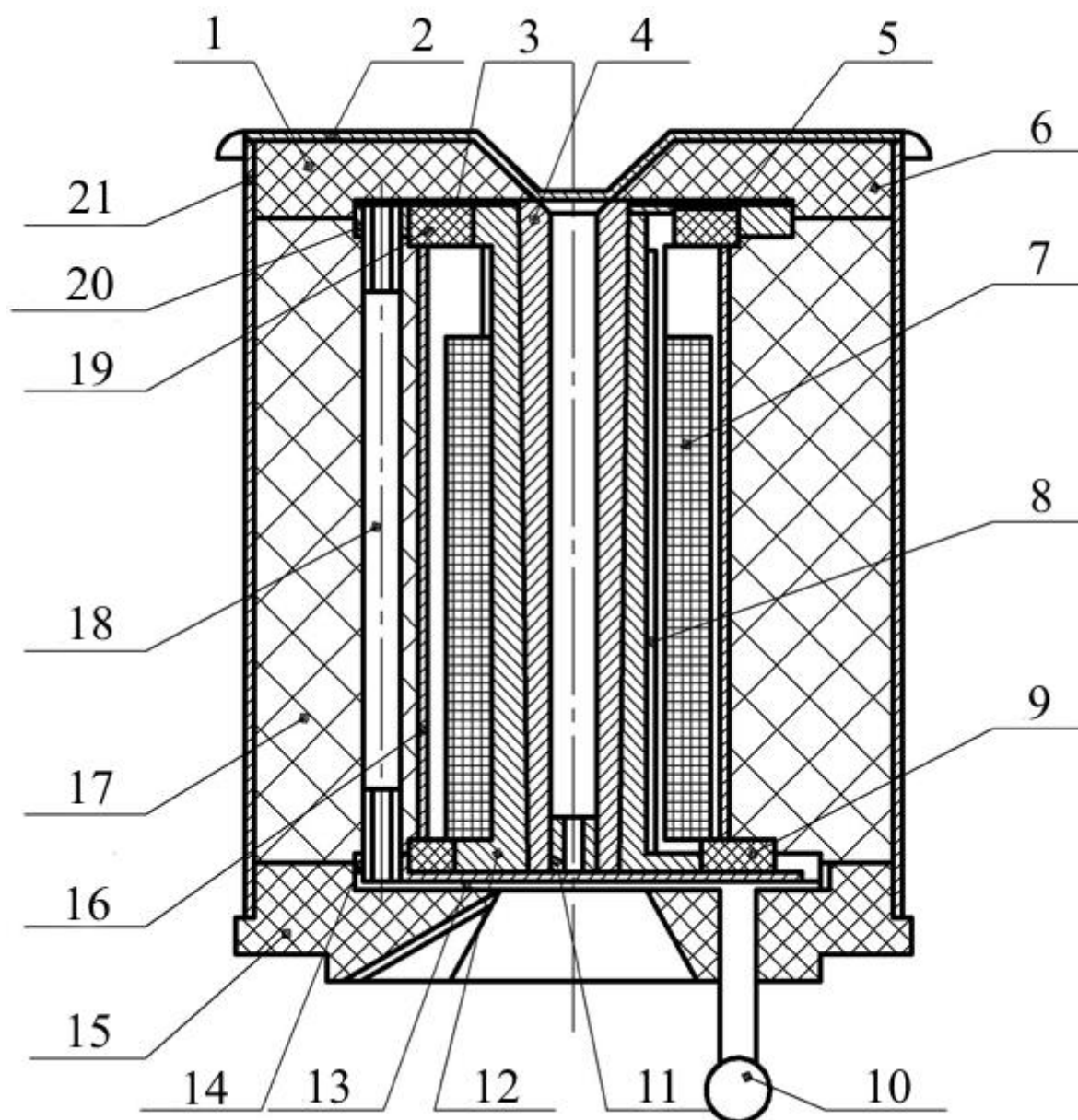


Рисунок 2.2 – Вимірювальна головка в розрізі (пояснення в тексті)

Реологічні властивості розплавів полімерів досліджуються на капілярному віскозиметрі типу ПРТ-3 в діапазоні швидкостей зсуву $\dot{\gamma}=10\ldots1000\text{ с}^{-1}$.

Технічна характеристика приладу ПРТ-3:

1. Розміри робочого комплексу деталей, мм

- діаметр каналу $9,54\pm0,016\text{ мм}$;
- діаметр поршня $9,48\pm0,010\text{ мм}$;
- сопло 1 – внутрішній діаметр $d_1=1\pm0,005\text{ мм}$; довжина

- $L_1=8\pm0,025$ мм;
- сопло 2 – внутрішній діаметр $d_2=1,18\pm0,005$ мм; довжина $L_2=8\pm0,025$ мм;
 - сопло 3 – внутрішній діаметр $d_3=1,5\pm0,005$ мм; довжина $L_3=12\pm0,025$ мм;
 - сопло 4 – внутрішній діаметр $d_4=2\pm0,005$ мм; довжина $L_4=16\pm0,025$ мм;
 - сопло 5 – внутрішній діаметр $d_5=2,095\pm0,005$ мм; довжина $L_5=8\pm0,025$ мм;
 - сопло 6 – внутрішній діаметр $d_6=2,095\pm0,005$ мм; довжина $L_6=16\pm0,025$ мм;
 - сопло 7 – внутрішній діаметр $d_7=2,5\pm0,005$ мм; довжина $L_7=20\pm0,025$ мм;
 - сопло 8 – внутрішній діаметр $d_8=3\pm0,005$ мм; довжина $L_8=24\pm0,025$ мм.

2. Набір вантажів: 0,45; 0,96; 1,2; 1,64; 4,095; 4,995 і 4,995 кг, а також поршень з тримачем масою 1,2 кг.

Принцип дії приладу базується на вимірюванні об'ємної продуктивності течії розплаву крізь каліброване сопло за різних фіксованих значень тиску та температури. Прилад складається з двох блоків: вимірювального пристрою та автоматичного регулятора температури.

Температура підтримувалася за допомогою одноканального ПІД-регулятора температури МікРа 600 (рис. 2.3). Технічні характеристики приладу наведені у табл. 2.1. Для зворотного зв'язку була використана хромель-алюмелева термопара. Діапазон регульованих температур в залежності від типу термопари наведений у табл. 2.2.



Рисунок 2.3 – Одноканальний ПІД-регулятор температур МикРа 600

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики регулятора

Дискретність завдання температури, °С	1,0
Закон регулювання каналу нагріву	ПІД
Вихідний сигнал керування	ШИМ
Точність підтримання температури у встановленому режимі	±0,5
Напруга живлення	110–250 В, 50–60 Гц
Розміри, мм	48 × 48 × 120
Маса, грам	170

Таблиця 2.2 – Діапазон регулювання Мікра-600

Тип ТП	ТХК (L)	ТХА (K)	ТЖК (J)	ТПП (S)	ТПП (R)	ТПР (B)	ТВР (A-2)	ТСМ - 50	ТСП - 50	ТСМ- 100	ТСП- 100
Температура, °С	від –50 до 550	від –50 до 1300	від –50 до 800	від 0 до 1700	від 0 до 1700	від 600 до 1700	від 0 до 1700	від –50 до 200	від –50 до 800	від –50 до 200	від –50 до 250

Час, за який матеріал видавлювався крізь сопло вимірявся за допомогою секундоміра «Інтеграл С-01» (рис. 2.4). Характеристики приладу наведені у табл. 2.3.



Рисунок 2.4 – Секундомір електронний "Інтеграл С-01"

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики секундоміра "Інтеграл С-01"

Параметр	Значення	Од. виміру
Дискретність відліку часу	0,01	с
Максимальний обсяг рахунку	9 год 59 хв 59,99 с	—
Запам'ятовується проміжних результатів	10	—
Габаритні розміри	77 x 58 x 18	мм

Межа допустимої додаткової абсолютної похибки секундоміра, викликаной відхиленням температури навколишнього середовища від нормальних умов в інтервалі робочих температур від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ відхилення температури не повинен перевищувати величини $\Delta 1 = (9,6 \times 10^{-6} \times T_x + 0,01)$, $\Delta 2 = 2,2 \times 10^{-6} \times T_x$.

Зразки полімеру зважувались на електронних лабораторних вагах марки ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги), (рис. 2.5). Характеристики приладу наведені у табл. 2.4.



Рисунок 2.5 – Ваги електронні лабораторні ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги)

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги)

Параметр	Значення	Од. виміру
Дискретність	0,005	г
Найменша границя зважування	0,1	г
Найбільша границя зважування	300	г
Діаметр платформи	120	мм
Клас точності по ГОСТ 53228-2008	II (високий)	—

2.2 Методика дослідження

При проведенні замірів швидкості зсуву за основу була взята методика, описана у ГОСТ 11645-73 «Метод визначення показника текучості розплаву термопластів» [100].

1. Підготувати прилад для дослідів. Перевірити вертикальність вимірювального каналу, поставивши рівень у циліндр 4 вимірювальної головки (рис. 2.2). При необхідності гвинтами опорної плити поставити канал вертикально (рис. 2.1). Встановити за датчиком необхідну температуру. Протерти поверхню вимірювального каналу м'якою ганчіркою. Ексцентриком 10 повернути затвор 13 і вставити в канал сопло 11 (рис. 2.2). Перевірити за допомогою дзеркала 10 (рис. 2.1), чи не перекриває затвор отвір сопла.

2. Увімкнути прилад в мережу і прогріти його протягом 1 год. Вимірювання починати після того, як задана температура зберігається без змін протягом 15 хв.

3. У вимірювальний канал завантажити досліджуваний матеріал і утрамбувати його, потім вставити поршень і через 2–3 хв. видавити зайвий полімер крізь сопло за допомогою видавлювального пристрою, поки нижня позначка (проточка) на поршні не буде знаходитися вище краю циліндра на 1...2 мм. Матеріал і поршень прогріти у вимірювальному каналі протягом 10 хв. Під час прогрівання матеріалу під диск тримача вантажів на вимірювальну головку поставити упор. Після прогрівання полімеру вийняти упор.

4. Поставити на тримач перший вантаж і підвести кінець вимірювального індикатора до поверхні вантажу. Під дією маси вантажів полімер буде видавлюватися крізь сопло.

5. Заміряти час t опускання поршня до другої поділки штока та масу полімерного зразка, що видавився за цей час. Дослід можна вважати вдалим, коли поршень опускається рівномірно і відношення маси зразка до часу опускання поршня не відрізняється більше, ніж на 5 %.

6. Температуру полімеру T , тип полімеру, розміри капіляра (діаметр d і довжину L), масу вантажів M , час опускання t і масу полімерного зразка m занести в журнал дослідів.

7. Вийняти сопло і залишки полімеру, прочистити вимірювальний канал і поршень, вставити сопло і, змінивши масу вантажу, продовжувати дослідів, починаючи з п. 3.

8. Досліди повторити (за пп. 3...7) при різних діаметрах капіляра.

9. Очистити установку від залишків полімеру.

Дослідження проводилися з такими полімерними матеріалами:

- Полістирол марки ПС-С-1-3 (ГОСТ 20282-86);
- Поліетилен високого тиску марки 15803-020 (ГОСТ 16337-77);
- Севілен марки 11104-030 (ТУ 6-05-1636-97).

Також, для дослідження впливу змащувальних речовин, був застосований змащувальний агент Zell Chemia CWN-105 при масовій концентрації змащувального агенту 5 %.

2.2.1 Методика виявлення наявності та характеру пристінних ефектів у полімерному матеріалі

За характером утворення пристінних ефектів полімерні матеріали можна розділити на три типи:

- без наявності пристінних ефектів;
- з наявністю пристінної швидкості за рахунок ковзання по стінці;
- з наявністю пристінної швидкості за рахунок утворення пристінного низькомолекулярного шару.

Відсутність пристінних ефектів визначається інваріантністю кривих течії при різних радіусах каналів.

За наявності пристінних ефектів криві течії при дослідженнях на різних радіусах не співпадають між собою.

Визначення характеру утворення пристінних ефектів можна здійснити за рахунок порівняння ефективних швидкостей зсуву при різних довжинах каналів однакового радіуса за виконання умови:

$$\tau_1 = \tau_2, \\ \frac{\Delta P_1 R}{2L_1} = \frac{\Delta P_2 R}{2L_2}.$$

При цьому перепади тиску в обох випадках будуть відрізнятися.

При наявності низькомолекулярного пристінного шару, який має властивості, близькі до ньютонівських, зміна тиску не буде впливати на швидкість зсуву. При ковзанні полімеру по стінці каналу зміна довжини каналу спричинить зміну ефективної швидкості зсуву, оскільки швидкість ковзання залежить від тиску.

Аналізуючи отримані дані, можливі два варіанти:

- при $\dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}_2$ має місце утворення низькомолекулярного шару;
- при $\dot{\gamma}_1 \neq \dot{\gamma}_2$ має місце ковзання по стінці.

Таким чином, маємо два підходи до визначення пристінної швидкості.

2.2.2 Методика визначення параметрів матеріалу за умови його ковзання по стінці

Середньоінтегральна швидкість зсуву потоку, що безпосередньо може бути обчислена:

$$\dot{\gamma}_{\text{сеп}} = \frac{1}{R} \int_0^R \dot{\gamma}_{\text{ст}} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr.$$

При цьому, враховуючи нелінійність течії, використовуємо поправку Рабіновича (1.38) для пристінної швидкості зсуву:

$$\dot{\gamma}_{\text{ст}} = \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3}. \quad (2.1)$$

Таким чином, середньоінтегральна швидкість зсуву потоку в цілому:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_{\text{сеп}} &= \frac{1}{R} \int_0^R \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr = \\ &= \frac{1}{R} \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} \frac{nR}{n+1} = \frac{3n+1}{4(n+1)} \frac{4Q}{\pi R^3}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Середньоінтегральна швидкість зсуву $\dot{\gamma}_{\text{сеп}}$ являє собою суму істинної швидкості зсуву в основному потоці $\dot{\gamma}_{\text{іст}}$ та швидкості зсуву на стінці $\dot{\gamma}_{\text{ст}}$:

$$\dot{\gamma}_{\text{сеп}} = \dot{\gamma}_{\text{ст}} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}. \quad (2.3)$$

Підставивши (2.1) та (2.2) у (2.3), отримаємо:

$$\frac{3n+1}{4(n+1)} \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}.$$

Враховуючи, що швидкість потоку визначається як:

$$v = \frac{Q}{\pi R^2}. \quad (2.4)$$

Отримаємо залежність, що має вигляд:

$$\frac{3n+1}{4(n+1)} \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{3n+1}{n} v_{\text{ст}} \frac{1}{R} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}. \quad (2.5)$$

При побудові графіку залежності $\dot{\gamma}_{\text{сер}}$ від $1/R$ отримуємо лінійну залежність, тангенс куту нахилу якої:

$$\text{tg}\alpha = \frac{3n+1}{n} v_{\text{ст}},$$

звідки

$$v_{\text{ст}} = \frac{n}{3n+1} \text{tg}\alpha. \quad (2.6)$$

Отримане рівняння дозволяє обчислювати швидкість розплаву полімерного матеріалу на стінці за умови проковзування по стінці.

2.2.3 Методика визначення параметрів матеріалу за умови утворення низькомолекулярного шару

Середньоінтегральна швидкість зсуву потоку, що безпосередньо може бути обчислена:

$$\dot{\gamma}_{\text{сер}} = \frac{1}{R} \int_0^R \dot{\gamma}_{\text{ст}} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr.$$

Швидкість зсуву на стінці з припущенням, властивостей низькомолекулярного шару, близьких до ньютонівських:

$$\dot{\gamma}_{\text{ст}} = \frac{4Q}{\pi R^3}. \quad (2.7)$$

Таким чином, середньоінтегральна швидкість зсуву потоку в цілому:

$$\dot{\gamma}_{\text{сеп}} = \frac{1}{R} \int_0^R \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr = \frac{1}{R} \frac{4Q}{\pi R^3} \frac{nR}{n+1} = \frac{n}{n+1} \frac{4Q}{\pi R^3}. \quad (2.8)$$

Підставивши (2.7) та (2.8) у (2.3), отримаємо:

$$\frac{n}{n+1} \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4Q}{\pi R^3} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}.$$

Враховуючи (2.4) отримаємо залежність, що має вигляд:

$$\frac{n}{n+1} \frac{4Q}{\pi R^3} = 4v_{\text{ст}} \frac{1}{R} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}. \quad (2.9)$$

При побудові графіку залежності $\dot{\gamma}_{\text{сеп}}$ від $1/R$ отримуємо лінійну залежність, тангенс куту нахилу якої:

$$\text{tg}\alpha = 4v_{\text{ст}},$$

звідки

$$v_{\text{ст}} = \frac{\text{tg}\alpha}{4}. \quad (2.10)$$

Отримане рівняння дозволяє обчислювати швидкість розплаву полімерного матеріалу на стінці за умови утворення на стінці низькомолекулярного пристінного шару.

2.3 Розрахунок похибок дослідження

2.3.1 Методика розрахунку похибок прямих вимірювань

Визначення похибки середнього результату вимірювань (як прямих, так і непрямих) фізичних величин здійснюється за методикою, наведеною в праці [101].

Так, похибку середнього результату прямих вимірювань фізичних величин виконується в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини \bar{x} визначають за залежністю

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (2.11)$$

де $\sigma_{\text{пвп}}$, $\sigma_{\text{пр}}$, $\sigma_{\text{окр}}$ – похибки первинного вимірювального перетворювача, приладу та округлення, відповідно:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3}, \quad (2.12)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_o}{100} D_{\text{вим}} \right), \quad (2.13)$$

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}}. \quad (2.14)$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка приладу;

γ_o – клас точності приладу;

$D_{\text{вим}}$ – діапазон вимірювання приладу;

C – ціна поділки шкали (ступінь дискретизації цифрового відліку) приладу.

Випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (2.15)$$

де x_i – i -й результат вимірювання;

ξ – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої імовірності P_d і кількості вимірювань n .

Повна похибка прямого вимірювання фізичної величини обчислюється за формулою

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{дін}}^2(\bar{x}) + \theta^2(\bar{x})}, \quad (2.16)$$

а значення фізичної величини становитиме

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x}). \quad (2.17)$$

2.3.2 Методика розрахунку похибок непрямих вимірювань

Похибку середнього результату непрямих вимірювань фізичних величин виконуємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату непрямих вимірювань фізичної величини \bar{x} визначають за формулою

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(x_k)}, \quad (2.18)$$

де $x = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$ – залежність шуканої величини x від величин x_i ($i = \overline{1, n}$), що вимірюють безпосередньо.

Випадкова помилка середнього результату в цьому разі становить

$$\theta(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \theta^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \theta^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \theta^2(x_k)}. \quad (2.19)$$

Остаточну повну похибку непрямого вимірювання фізичної величини з урахуванням (2.18) і (2.19) визначають за залежністю (2.16), а значення

фізичної величини – за залежністю (2.17).

2.3.3 Розрахунок похибки вимірювання температури

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (2.12) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{2,5}{3} = \pm 0,833 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка хромель-алюмелевої термопари:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

Похибка приладу згідно з (2.13) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,5}{100} \cdot (1300 - (-50)) \right) = 2,25 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

Похибка округлення згідно з (2.14) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.11):

$$\sigma_{\text{дп}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,833^2 + 2,25^2 + 0,289^2} = 2,417 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання температури. Для визначення випадкової похибки проводили чотири вимірювання температури, які становили 219; 220; 220; 219; 220 $^{\circ}\text{C}$.

Середнє арифметичне температури становить

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{1}{5} (219 + 220 + 220 + 219 + 220) = 219,6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned}\theta(\bar{T}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{T} - T_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(219 - 219,6)^2 + (220 - 219,6)^2 + (220 - 219,6)^2 + (219 - 219,6)^2 + (220 - 219,6)^2]} = \\ &= 0,348 \text{ } ^\circ\text{C},\end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$ [101].

Повна похибка прямого вимірювання температури (2.16)

$$\sigma(\bar{T}) = \sqrt{2,417^2 + 0,348^2} = 2,442 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення температури відповідно до (2.17) становить

$$T = \bar{T} \pm \sigma(\bar{T}) = \bar{T} \pm 2,422 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2.3.4 Розрахунок похибки вимірювання маси

Похибка зважування згідно з (2.12) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{0,0004}{3} = \pm 0,00013 \text{ г},$$

де довідникова похибка приладу ТВЕ-0,3-0,005 становить:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 0,0004 \text{ г}.$$

Похибка приладу згідно з (2.13) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,004}{100} \cdot (300 - 0,1) \right) = 0,004 \text{ г}.$$

Похибка округлення згідно з (2.14) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,005}{\sqrt{12}} = 0,0014 \text{ г.}$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.11):

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,00013^2 + 0,004^2 + 0,0014^2} = 0,0042 \text{ г.}$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання ваги. Для визначення випадкової похибки проводили чотири вимірювання ваги, які становили 1,000; 0,995; 0,995; 1,000; 1,000 г.

Середнє арифметичне ваги становить

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i = \frac{1}{5} (1,000 + 0,995 + 0,995 + 1,000 + 1,000) = 0,998 \text{ г.}$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{m}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{m} - m_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(1-0,998)^2 + (0,995-0,998)^2 + (0,995-0,998)^2 + (1-0,998)^2 + (1-0,998)^2]} = \\ &= 0,0071 \text{ г,} \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стьюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$ [101].

Повна похибка прямого вимірювання ваги (2.16)

$$\sigma(\bar{m}) = \sqrt{0,0042^2 + 0,0071^2} = 0,0082 \text{ г.}$$

Значення ваги відповідно до (2.17) становить

$$m = \bar{m} \pm \sigma(\bar{m}) = \bar{m} \pm 0,0082 \text{ г.}$$

У більшості вимірювань фізичних величин значення випадкової помилки їх середнього результату значно менше від значення дослідно-інструментальної

помилки, тому надалі для визначення повної похибки прямого вимірювання фізичних величин братимемо до уваги тільки дослідно-інструментальну помилку, тобто приймаємо, що $\sigma(\bar{x}) = \sigma_{\text{дін}}(\bar{x})$.

2.3.5 Розрахунок похибки вимірювання часу

Похибка вимірювання часу згідно з (2.12) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{1 \cdot 10^{-5}}{3} = \pm 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

де довідникова похибка приладу «Інтеграл С-01» становить

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 1 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Похибка приладу згідно з (2.13) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{10^{-3}}{100} \cdot 1 \right) = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Похибка округлення згідно з (2.14) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,0029 \text{ с}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.11):

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{t}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,00000333^2 + 0,00000333^2 + 0,0029^2} = 0,0029 \text{ с}.$$

Тепер визначимо величину суб'єктивної похибки. Середній час реакції людини на зоровий подразник близько 0,2 с (враховуючи час запуску і зупинки секундоміру, суб'єктивна похибка складає – $\sigma_{\text{суб}} = 0,4 \text{ с}$)

Повна похибка прямого вимірювання ваги (2.16)

$$\sigma(\bar{t}) = \sqrt{0,4^2 + 0,0029^2} = 0,4 \text{ с.}$$

Значення ваги відповідно до (2.17) становить

$$t = \bar{t} \pm \sigma(\bar{t}) = \bar{t} \pm 0,4 \text{ с.}$$

2.3.6 Розрахунок похибки непрямих вимірювань швидкості зсуву

Швидкість зсуву полімеру визначається

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q_v}{\pi R^3} = \frac{4Q_m}{\pi R^3 \rho} = \frac{4m}{\pi R^3 \rho t} = \frac{4m}{3,14 \cdot 0,001^3 \cdot 950t} = 1,34 \cdot 10^6 \frac{m}{t}.$$

Визначимо частинні похідні від параметрів, що впливають на швидкість зсуву

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial m} &= \frac{1,34 \cdot 10^6}{t}, \\ \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial t} &= -\frac{1,34 \cdot 10^6 \cdot m}{t^2}. \end{aligned}$$

Дослідно-інструментальна помилка середнього результату непрямих вимірювань фізичної величини за (2.18)

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{дін}}(\bar{\dot{\gamma}}) &= \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial m}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(m) + \left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial t}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(t)} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1,34 \cdot 10^6}{t}\right)^2 \cdot (0,0042 \cdot 10^{-3})^2 + \left(-\frac{1,34 \cdot 10^6 \cdot m}{t^2}\right)^2 \cdot 0,0029^2} = 0,476 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

Випадкова помилка середнього результату за (2.19)

$$\theta(\dot{\gamma}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial m}\right)^2 \theta^2(m) + \left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial t}\right)^2 \sigma_{\text{cyo}}^2(t)} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1,34 \cdot 10^6}{t}\right)^2 \cdot (0,0071 \cdot 10^{-3})^2 + \left(-\frac{1,34 \cdot 10^6 \cdot m}{t^2}\right)^2 0,4^2} = 0,398 \text{ c}^{-1}.$$

Повна похибка визначення швидкості зсуву за (2.16)

$$\sigma(\dot{\gamma}) = \sqrt{\sigma_{\text{дип}}^2(\dot{\gamma}) + \theta^2(\dot{\gamma})} = \sqrt{0,476^2 + 0,398^2} = 0,62 \text{ c}^{-1}.$$

Відносна похибка вимірювань

$$\varepsilon(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} 100\% = \frac{0,62}{20} 100\% = 3,1\%.$$

Значення швидкості зсуву становить

$$\dot{\gamma} = \bar{\dot{\gamma}} \pm \varepsilon(\dot{\gamma}) = \bar{\dot{\gamma}} \pm 3,1\%. \quad (2.20)$$

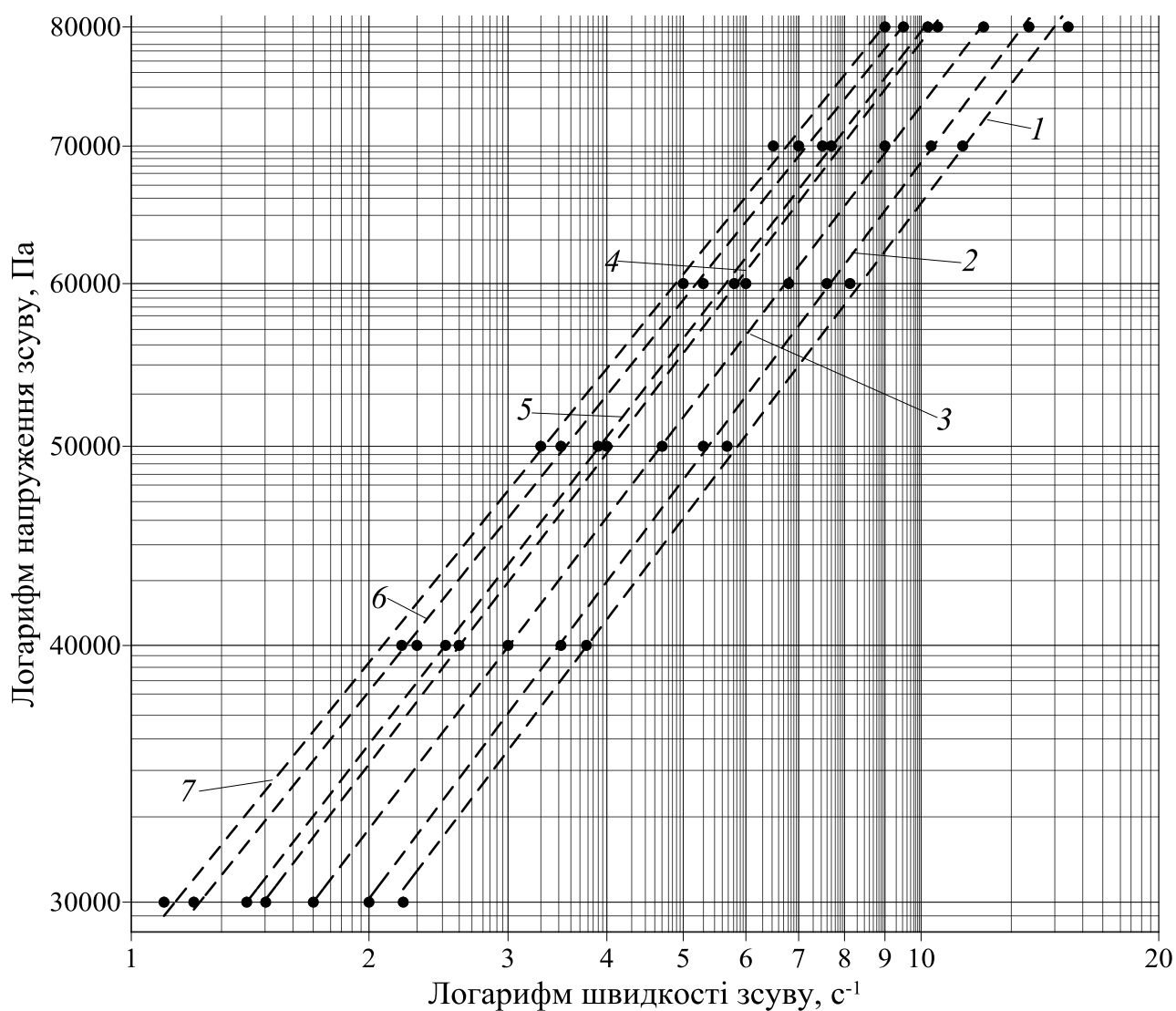
Встановлена похибка є критерієм для визначення граничної величини відхилення значень швидкості зсуву при визначенні характеру пристінних ефектів у розплаві полімеру. Методика визначення характеру пристінних ефектів описана у п. 2.2.1.

2.4 Визначення характеру, величини пристінних ефектів та параметрів матеріалу

Використовуючи методики, описані у п. 2.2, було здійснено обробку експериментальних даних для всіх досліджуваних матеріалів з метою визначення характеру та величини пристінних ефектів.

2.4.1 Поліетилен високого тиску 15803-020

Виходячи з даних, отриманих шляхом дослідження течії ПЕВТ 15803-020 на 7-ми діаметрах капілярів при різних напруженнях зсуву побудовано графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву, зображений на рис. 2.6.



Діаметр капіляру: 1 – 1 мм; 2 – 1,18 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,095 мм;
6 – 2,5 мм; 7 – 3 мм.

Рисунок 2.6 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву при різних діаметрах каналу

З графіка на рис. 2.6 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не співпадають між собою. Неінваріантний характер кривих залежності, згідно п. 2.2.1, свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів, згідно методики описаної у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час дослідів з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами при постійному напруженні зсуву (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

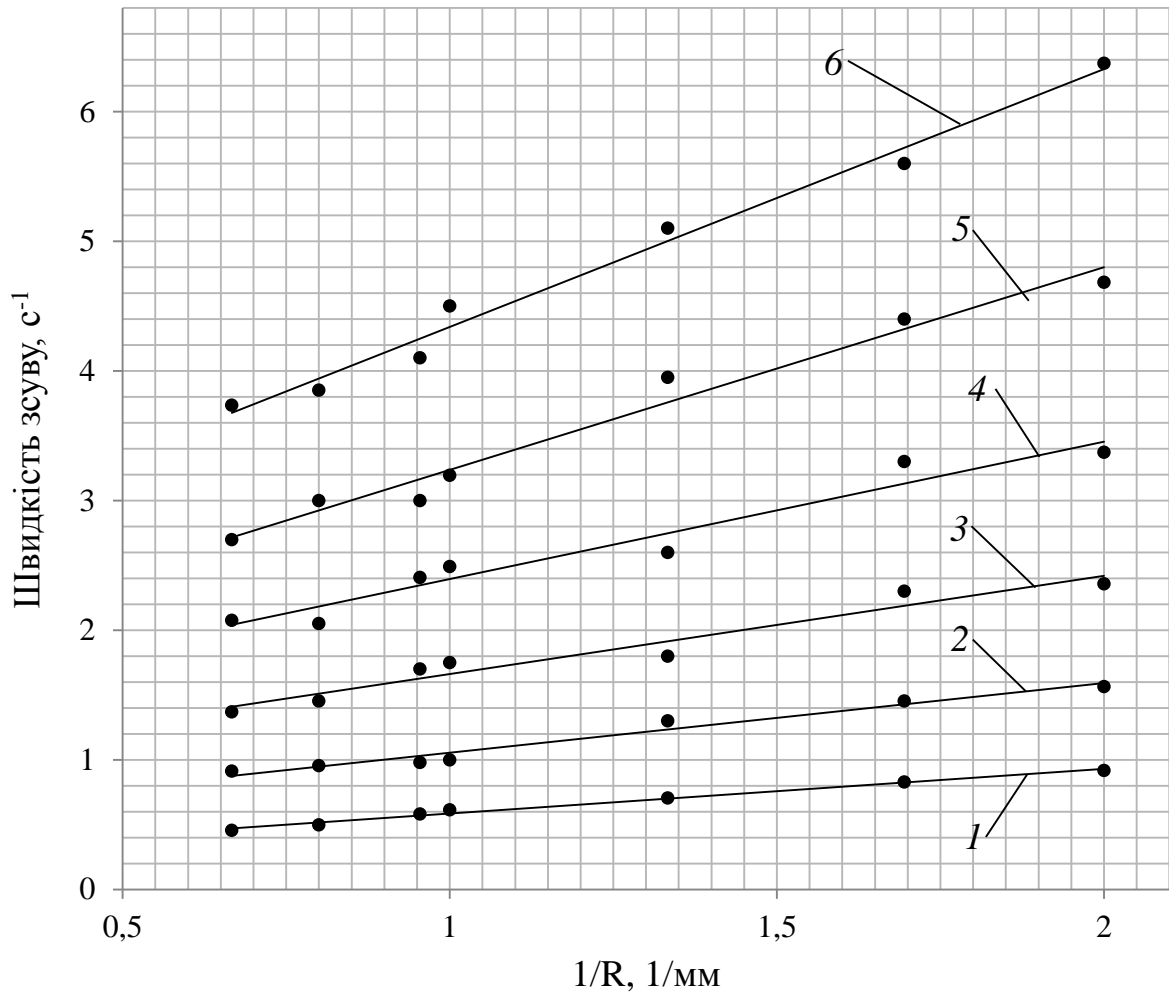
$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	0,83
2,095	16	2,4	10781	0,87

Як видно з табл. 2.5 швидкості зсуву відрізняються більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про ковзання ПЕВТ 15803-020 по стінці, тому застосовуємо методику описану у п. 2.2.2.

За даними графіка, зображеного на рис. 2.6 визначається індекс течії ПЕВТ 15803-020:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,492.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.2) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, при різних значеннях напруження зсуву (рис. 2.7).



Напруження зсуву: 1 – 0,03 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,05 МПа; 4 – 0,06 МПа;
5 – 0,07 МПа; 6 – 0,08 МПа.

Рисунок 2.7 – Залежність швидкості зсуву від $1/R$ при різних напруженнях зсуву для ПЕВТ 15803-020

Виконавши лінійну апроксимацію точок, представлених на рис. 2.7, отримаємо наступні вирази:

$$\dot{\gamma} = 0,344 \frac{1}{R} + 0,242, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,5106 \frac{1}{R} + 0,5613, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,7632 \frac{1}{R} + 0,8794, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,9881 \frac{1}{R} + 1,4524, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,509 \frac{1}{R} + 1,6926, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,9776 \frac{1}{R} + 2,3698, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.5), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкостей на стінці каналу виходячи з (2.6), що показана на рис. 2.8.

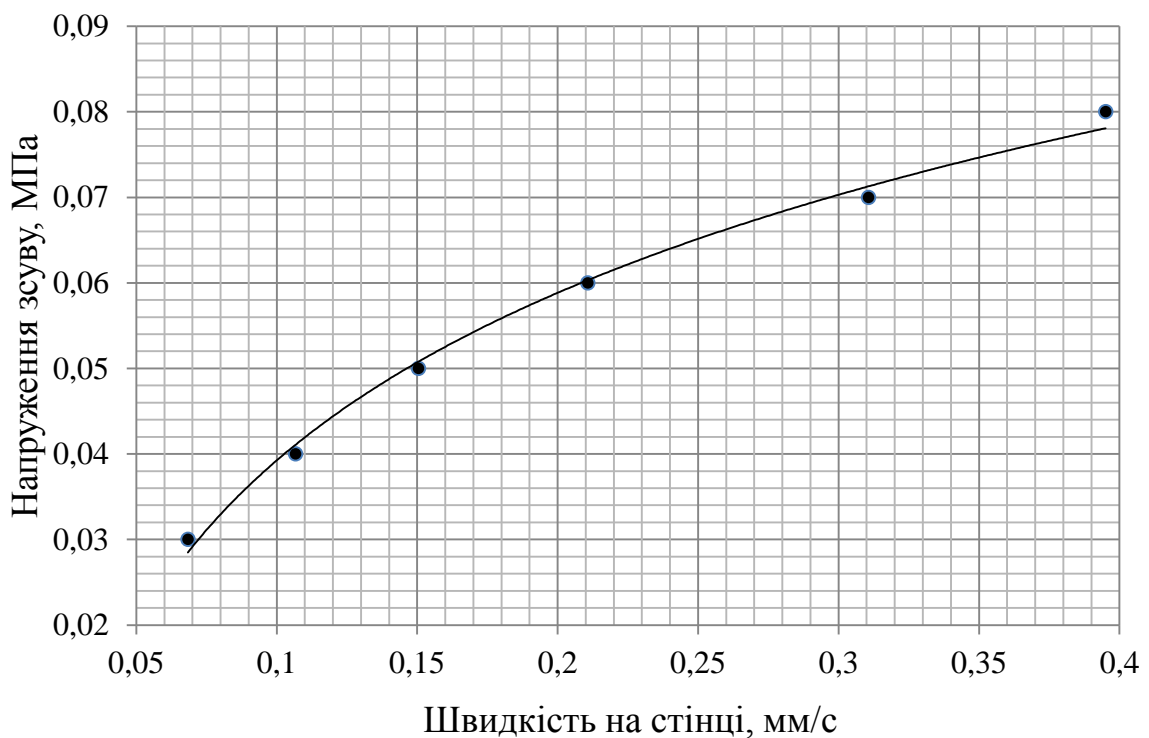


Рисунок 2.8 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПЕВТ 15803-020

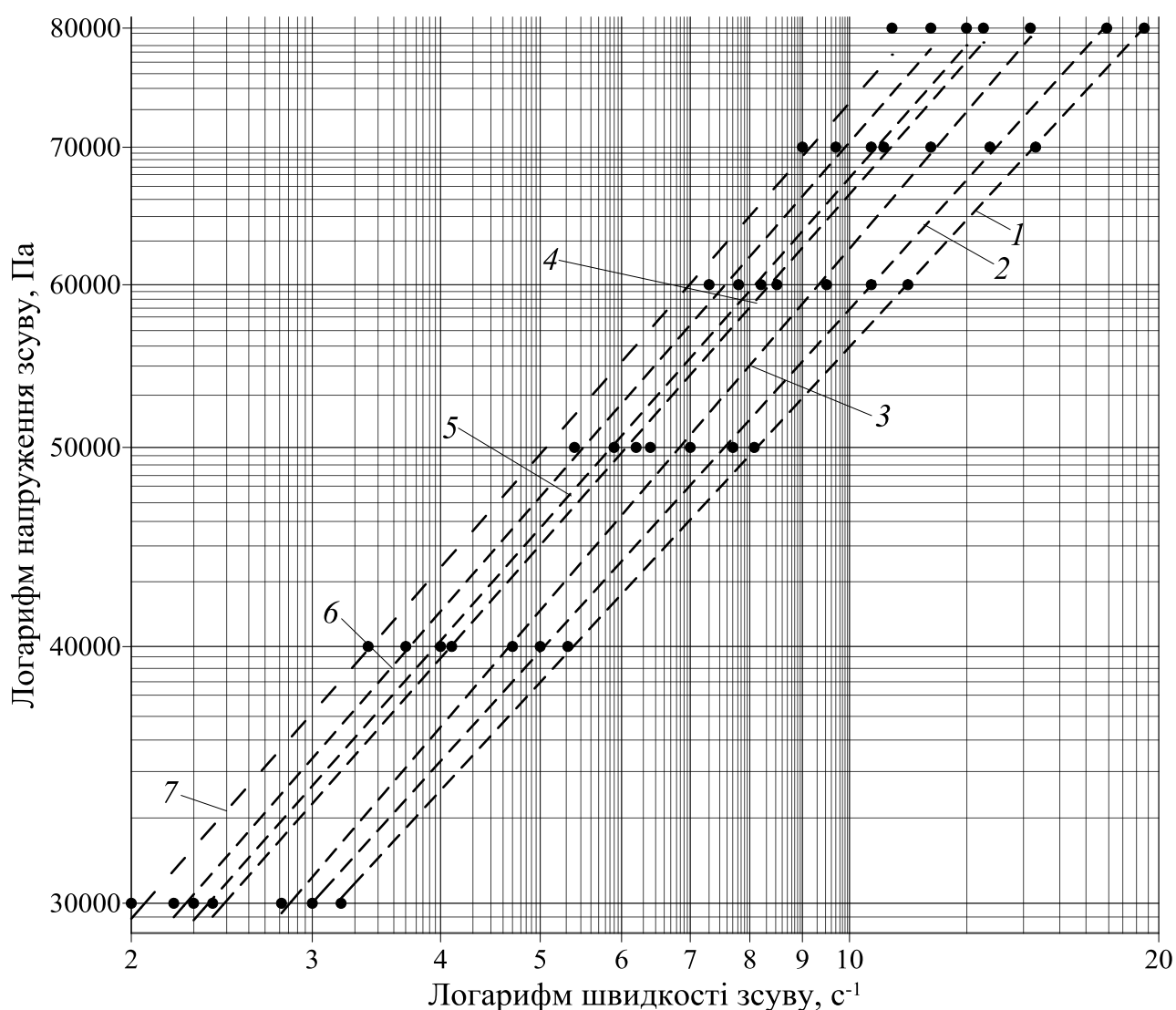
Як видно з графіку, зображеного на рис. 2.8, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом:

$$\tau = 8,196 \cdot 10^6 v_{\text{КОВЗ}}^{0,581},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.2 Поліетилен високого тиску з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105

Виходячи з даних, отриманих шляхом дослідження течії ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом на 7-ми діаметрах капілярів при різних напруженнях зсуву побудовано графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву, зображений на рис. 2.9.



Діаметр капіляру: 1 – 1 мм; 2 – 1,18 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,095 мм;
6 – 2,5 мм; 7 – 3 мм.

Рисунок 2.9 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву при різних діаметрах каналу

З графіка рис. 2.9 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не співпадають між собою. Неінваріантний характер кривих залежності, згідно п. 2.2.1, свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів, згідно методики описаної у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час дослідів з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами при постійному напруженні зсуву (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

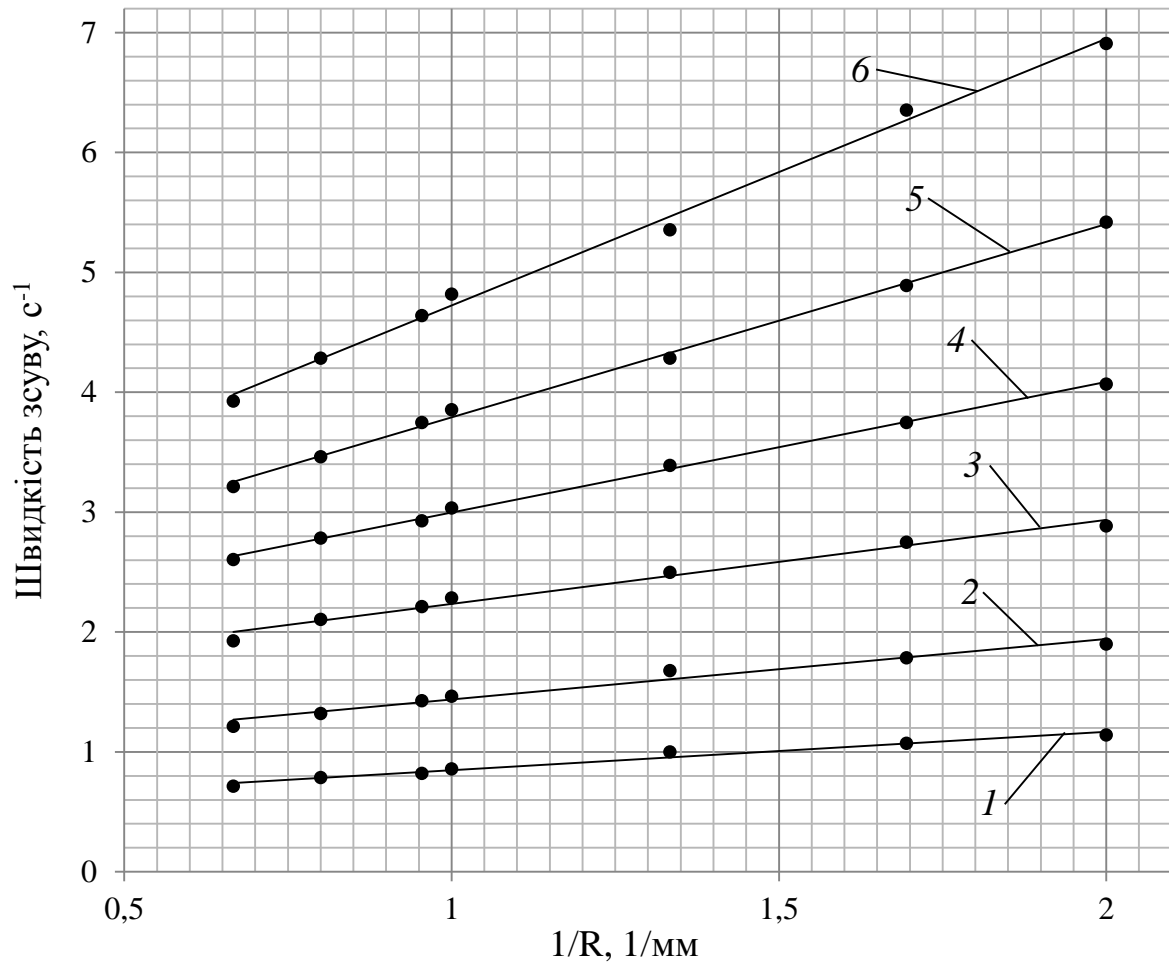
$D_{\text{кап}}, \text{ мм}$	$L_{\text{кап}}, \text{ мм}$	$m, \text{ кг}$	$\tau, \text{ Па}$	$\dot{\gamma}, \text{ с}^{-1}$
2,095	8	1,2	10781	1,05
2,095	16	2,4	10781	1,06

Як видно з табл. 2.6 швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, зображеного на рис. 2.9 визначається індекс течії ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,555.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, при різних напруженнях зсуву (рис. 2.10).



Напруження зсуву: 1 – 0,03 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,05 МПа; 4 – 0,06 МПа;
5 – 0,07 МПа; 6 – 0,08 МПа.

Рисунок 2.10 – Залежність середньоінтегральної швидкості зсуву від $1/R$ при різних напруженнях зсуву для ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом

Виконавши лінійну апроксимацію точок, представлених на рис. 2.10, отримаємо наступні вирази:

$$\dot{\gamma} = 0,3207 \frac{1}{R} + 0,5255, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,5053 \frac{1}{R} + 0,9309, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,6996 \frac{1}{R} + 1,5356, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,0879 \frac{1}{R} + 1,9092, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,612 \frac{1}{R} + 2,178, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 2,2252 \frac{1}{R} + 2,4974, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкостей на стінці каналу виходячи з (2.10), що показана на рис. 2.11.

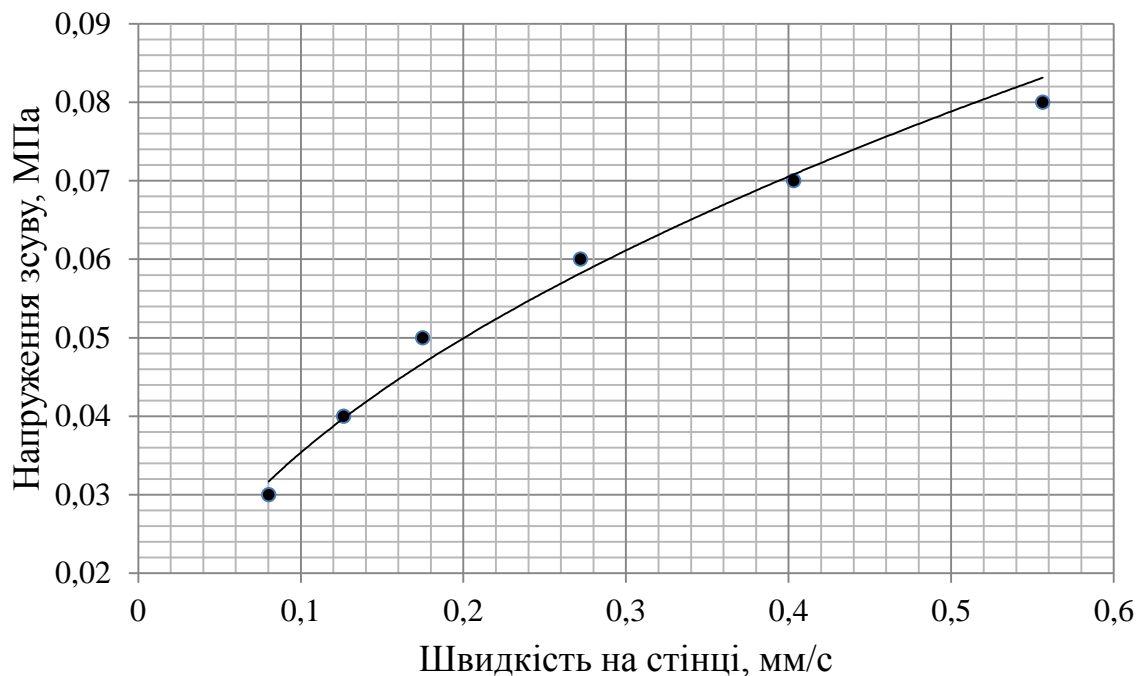


Рисунок 2.11 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом

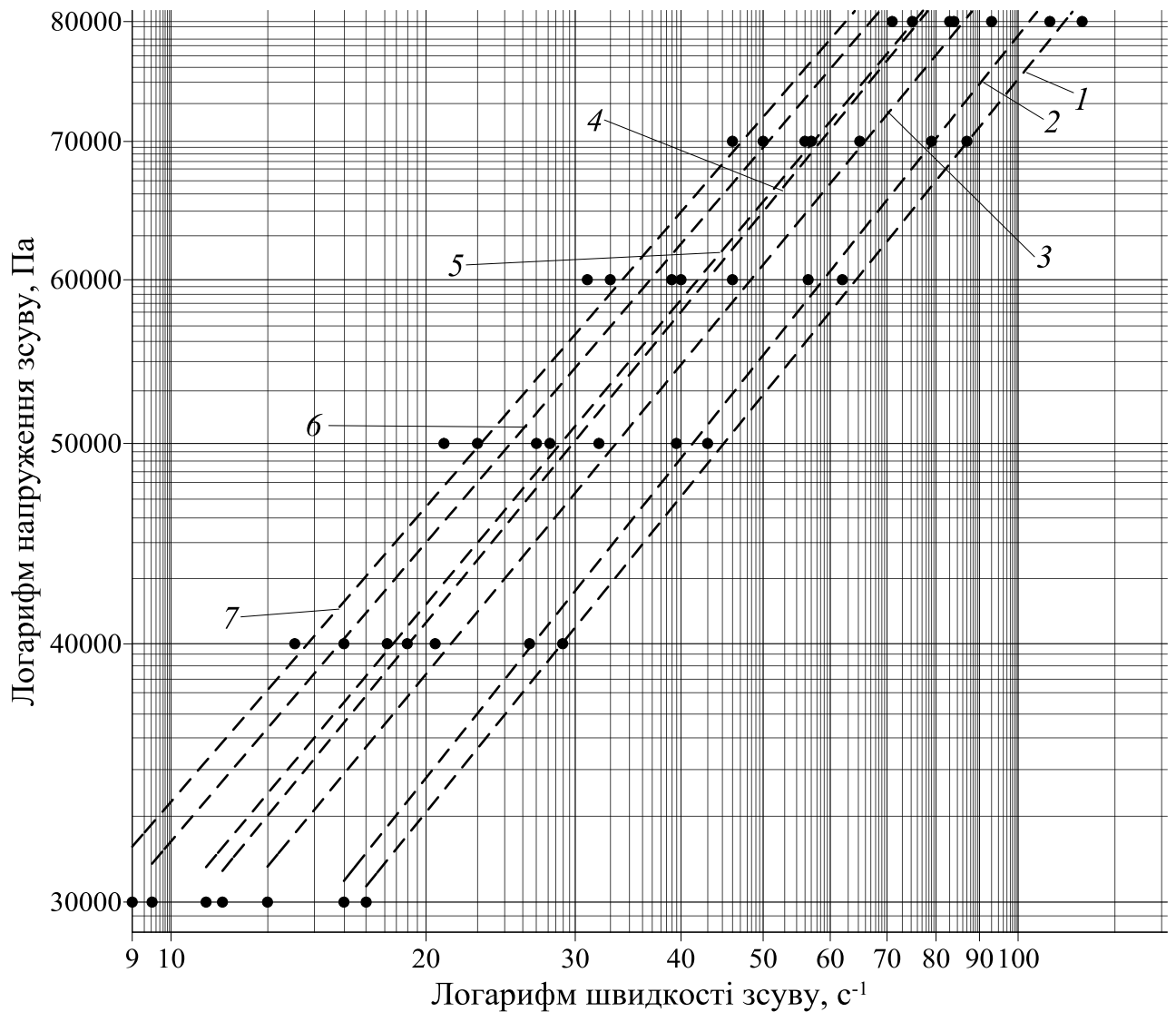
Як видно з графіку, зображеного на рис. 2.11, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується залежністю:

$$\tau = 4,275 \cdot 10^6 v_{\text{КОВЗ}}^{0,522},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.3 Севілен 11104-030

Виходячи з даних, отриманих шляхом дослідження течії севілену 11104-030 на 7-ми діаметрах капілярів при різних напруженнях зсуву побудовано графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву, зображений на рис. 2.12.



Діаметр капіляру: 1 – 1 мм; 2 – 1,18 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,095 мм;
6 – 2,5 мм; 7 – 3 мм.

Рисунок 2.12 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву при різних діаметрах каналу

З графіка рис. 2.12 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не співпадають між собою. Неінваріантний характер кривих залежності, згідно п. 2.2.1, свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів, згідно методики описаної у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час дослідів з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами при постійному напруженні зсуву (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

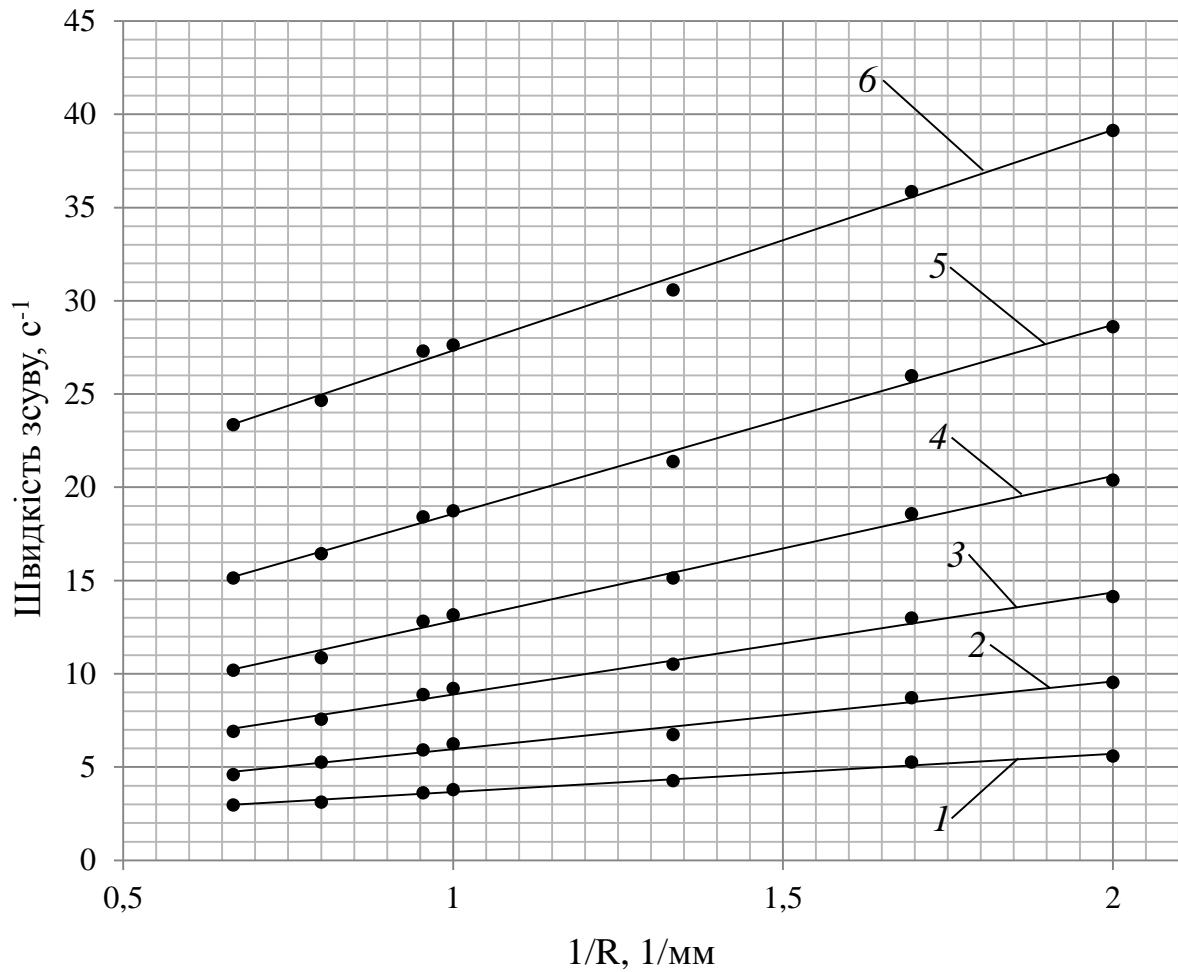
$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	5,91
2,095	16	2,4	10781	5,95

Як видно з табл. 2.7 швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, зображеного на рис. 2.12 визначається індекс течії севілену 11104-030:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,49.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, при різних напруженнях зсуву (рис. 2.13).



Напруження зсуву: 1 – 0,03 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,05 МПа; 4 – 0,06 МПа;
5 – 0,07 МПа; 6 – 0,08 МПа.

Рисунок 2.13 – Залежність середньоінтегральної швидкості зсуву від $1/R$ при різних напруженнях зсуву для севілену 11104-030

Виконавши лінійну апроксимацію точок, представлених на рис. 2.13, отримаємо наступні вирази:

$$\dot{\gamma} = 2,0538 \frac{1}{R} + 1,6071, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 3,6256 \frac{1}{R} + 2,3417, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 5,4725 \frac{1}{R} + 3,4244, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 7,7764 \frac{1}{R} + 5,0596, \text{ при } \tau=0,06 \text{ МПа ;}$$

$$\dot{\gamma} = 10,131 \frac{1}{R} + 8,4424, \text{ при } \tau=0,07 \text{ МПа ;}$$

$$\dot{\gamma} = 11,824 \frac{1}{R} + 15,513, \text{ при } \tau=0,08 \text{ МПа .}$$

З наведених виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкостей на стінці каналу виходячи з (2.10), що показана на рис. 2.14.

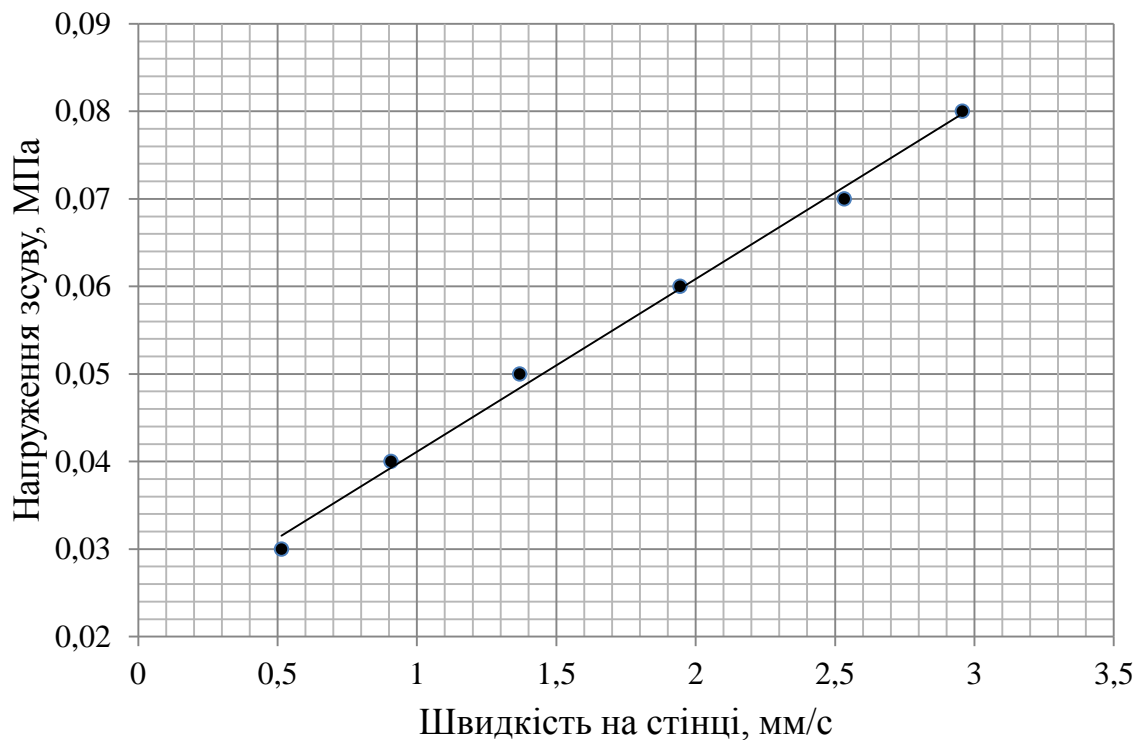


Рисунок 2.14 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для севілену 11104-030

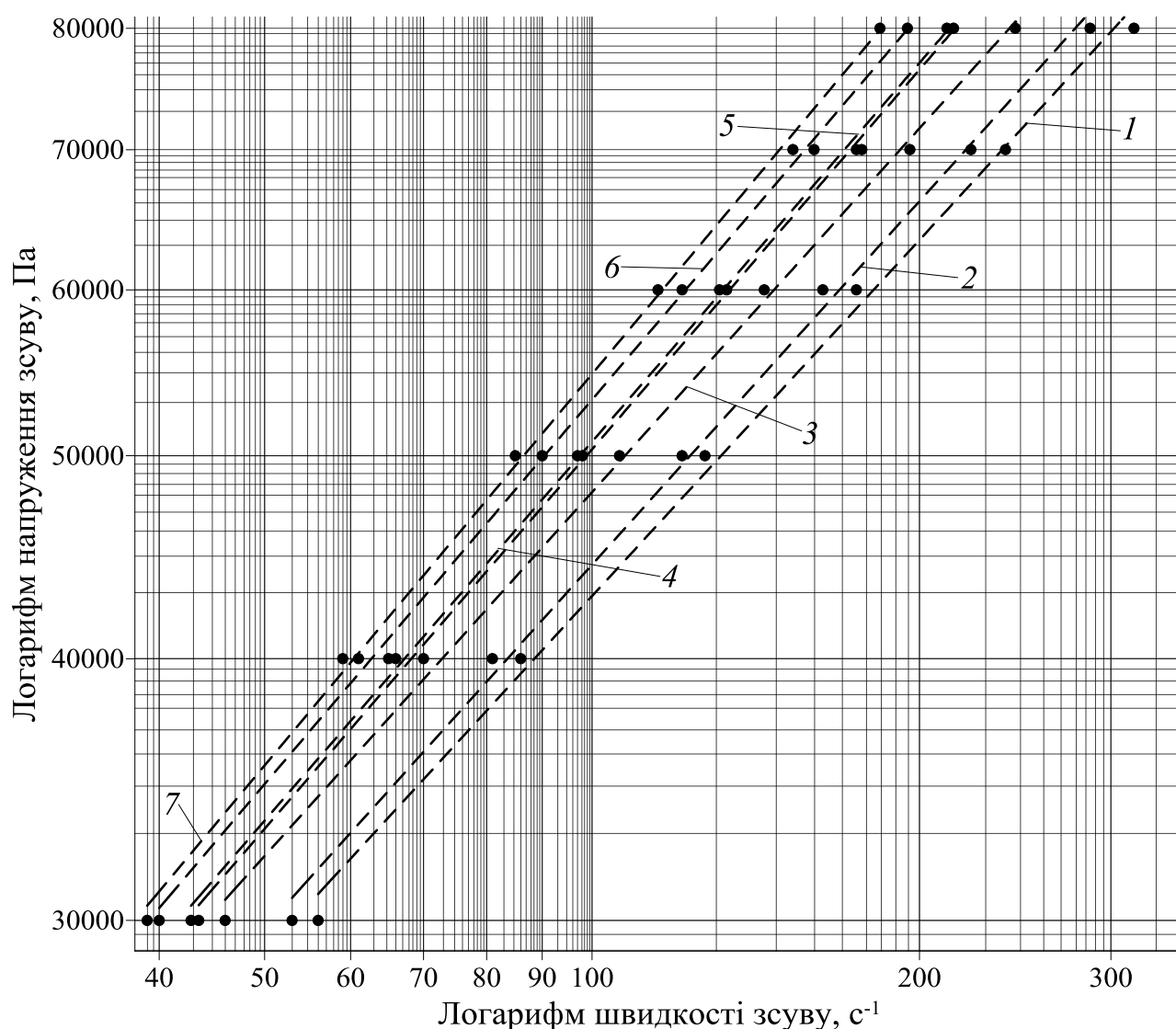
Як видно з графіку, зображеного на рис. 2.14, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має лінійний характер та описується виразом:

$$\tau = 1,973 \cdot 10^7 + 2,14 \cdot 10^4 v_{\text{КОВЗ}},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.4 Севілен 11104-030 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105

Виходячи з даних, отриманих шляхом дослідження течії севілену 11104-030 зі змащувальним агентом на 7-ми діаметрах капілярів при різних напруженнях зсуву побудовано графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву, зображений на рис. 2.15.



Діаметр капіляру: 1 – 1 мм; 2 – 1,18 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,095 мм;
6 – 2,5 мм; 7 – 3 мм.

Рисунок 2.15 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву при різних діаметрах каналу

З графіка на рис. 2.15 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не співпадають між собою. Неінваріантний характер кривих залежності, згідно п. 2.2.1, свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів, згідно методики описаної у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами при постійному напруженні зсуву (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

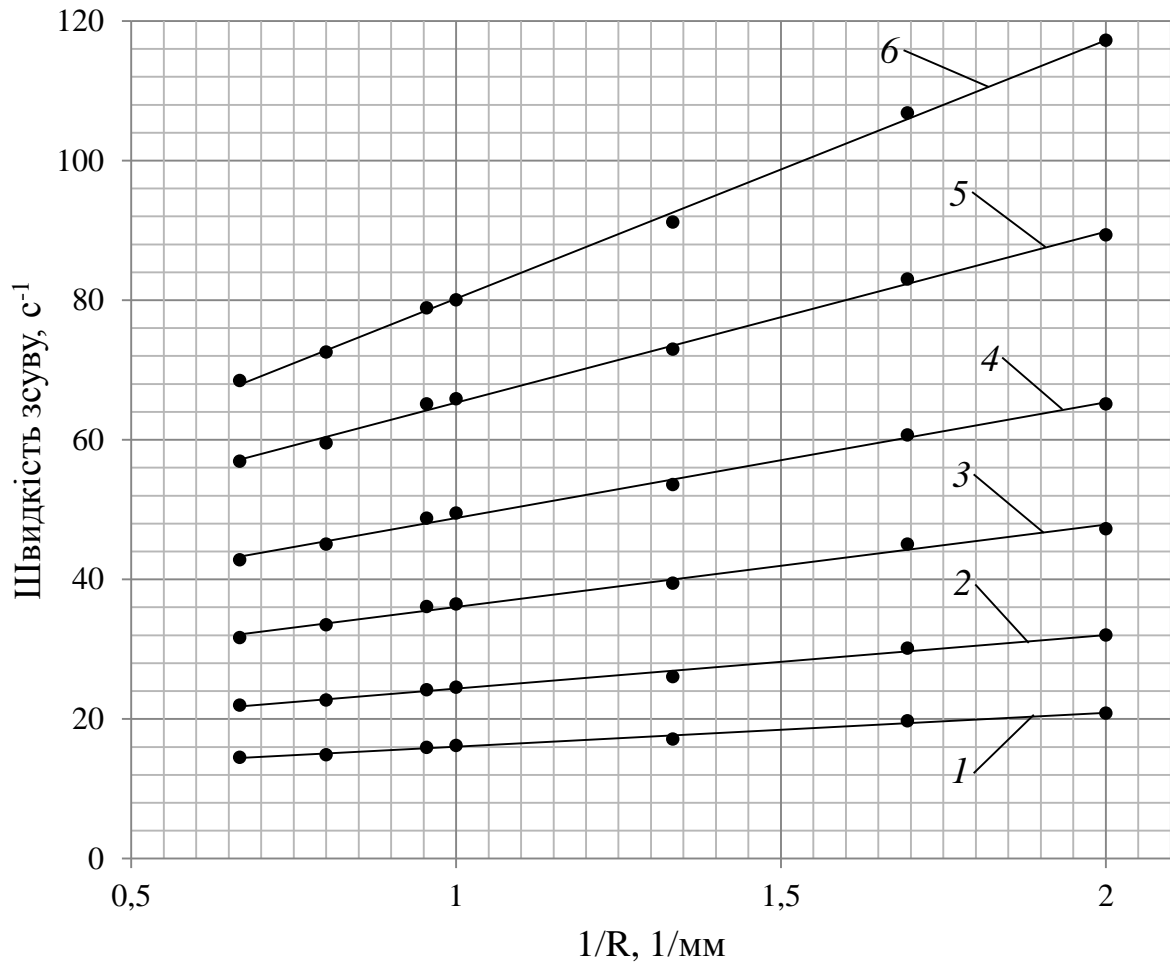
$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	11,6
2,095	16	2,4	10781	11,67

Як видно з табл. 2.8 швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, зображеного на рис. 2.15 визначається індекс течії севілену 11104-030 зі змащувальним агентом:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,593.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, при різних напруженнях зсуву (рис. 2.16).



Напруження зсуву: 1 – 0,03 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,05 МПа; 4 – 0,06 МПа;
5 – 0,07 МПа; 6 – 0,08 МПа.

Рисунок 2.16 – Залежність середньоінтегральної швидкості зсуву від $1/R$ при різних напруженнях зсуву для севілену 11104-030 зі змащувальним агентом

Виконавши лінійну апроксимацію точок, представлених на рис. 2.16, отримаємо наступні вирази:

$$\dot{\gamma} = 4,8609 \frac{1}{R} + 11,166, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 7,6538 \frac{1}{R} + 16,713, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 11,772 \frac{1}{R} + 24,292, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 16,579 \frac{1}{R} + 32,21, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 24,488 \frac{1}{R} + 40,85, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 37,008 \frac{1}{R} + 43,234, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкостей на стінці каналу виходячи з (2.10), що показана на рис. 2.17.

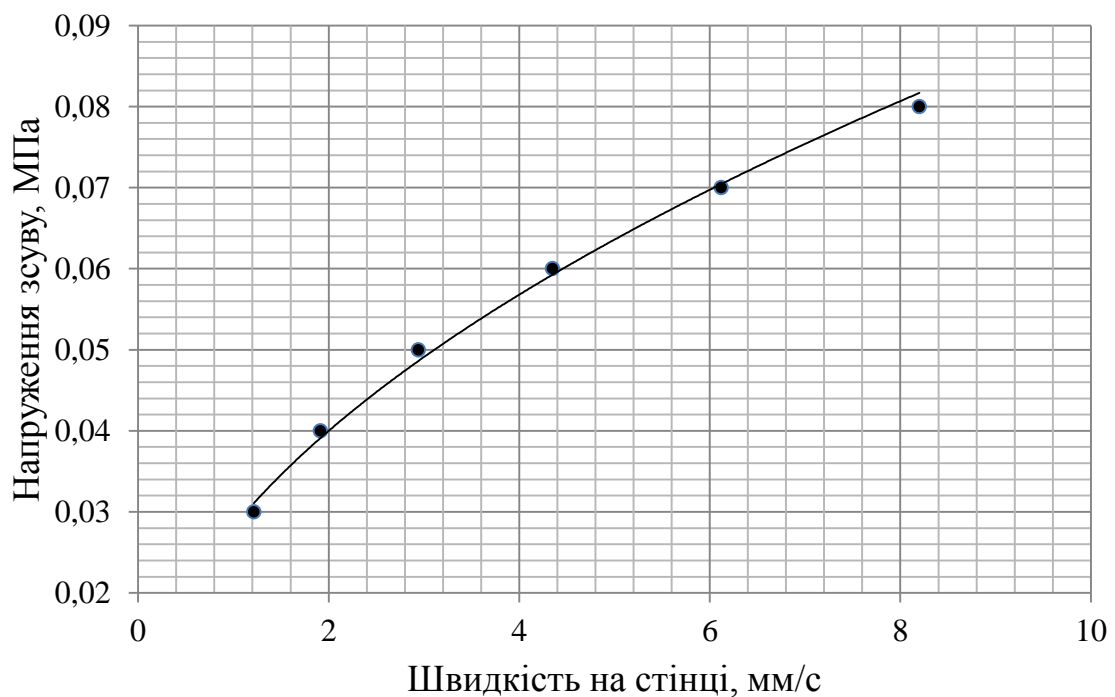


Рисунок 2.17 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для севілену 11104-030 зі змащувальним агентом

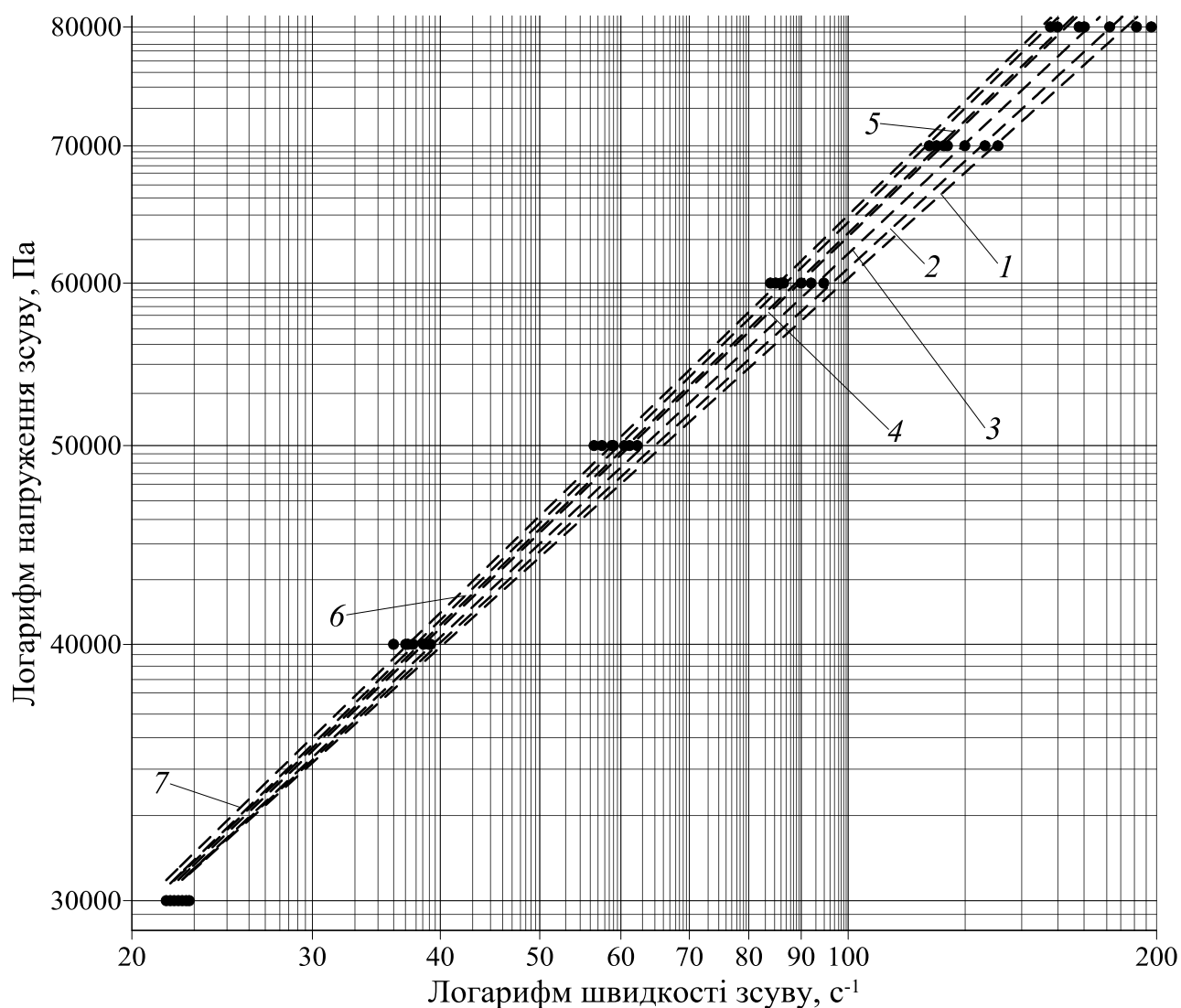
Як видно з графіку, зображеного на рис. 2.17, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом:

$$\tau = 9,296 \cdot 10^5 v_{\text{КОВЗ}}^{0,506},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.5 Полістирол марки ПС-С-1-3

Виходячи з даних, отриманих шляхом дослідження течії ПС-С-1-3 на 7-ми діаметрах капілярів при різних напруженнях зсуву, побудовано графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву, зображений на рис. 2.18.



Діаметр капіляру: 1 – 1 мм; 2 – 1,18 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,095 мм;
6 – 2,5 мм; 7 – 3 мм.

Рисунок 2.18 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву при різних діаметрах каналу

З графіка на рис. 2.18 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не співпадають між собою. Неінваріантний характер кривих залежності, згідно п. 2.2.1, свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів, згідно методики описаної у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами при постійному напруженні зсуву (табл. 2.9).

Таблиця 2.9

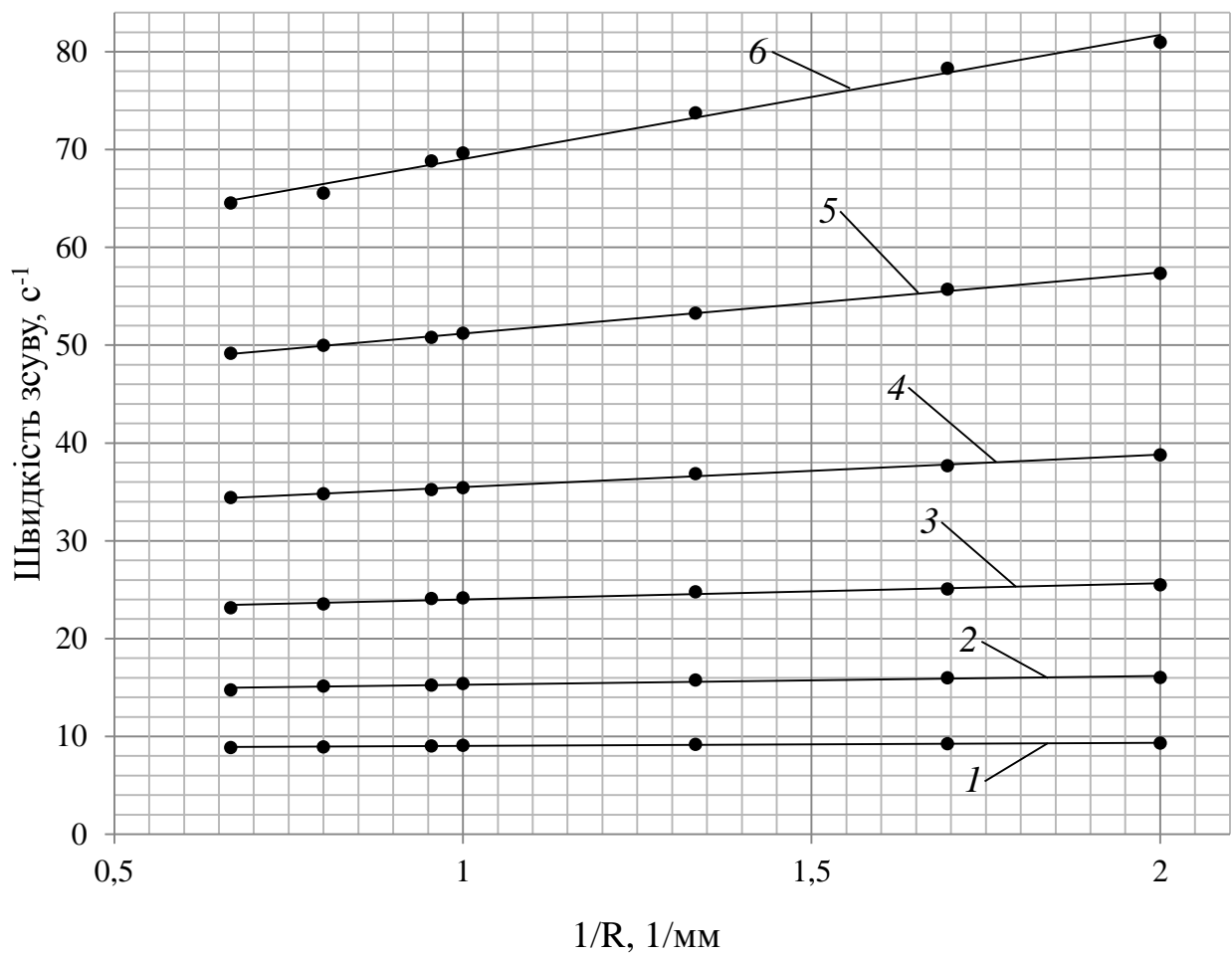
$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	8,26
2,095	16	2,4	10781	8,72

Як видно з табл. 2.9 швидкості зсуву відрізняються більше ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про ковзання ПС-С-1-3 по стінці, тому застосовуємо методику описану у п. 2.2.2.

За даними графіка, зображеного на рис. 2.18 визначається індекс течії ПС-С-1-3:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,469.$$

Виходячи з експериментальних даних, побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.2) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, при різних напруженнях зсуву (рис. 2.19).



Напруження зсуву: 1 – 0,03 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,05 МПа; 4 – 0,06 МПа;
5 – 0,07 МПа; 6 – 0,08 МПа.

Рисунок 2.19 – Залежність середньоінтегральної швидкості зсуву від $1/R$ при різних напруженнях зсуву для ПС-С-1-3

Виконавши лінійну апроксимацію точок, представлених на рис. 2.19, отримаємо наступні вирази:

$$\dot{\gamma} = 0,3395 \frac{1}{R} + 8,6815, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,9135 \frac{1}{R} + 14,372, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,6565 \frac{1}{R} + 22,33, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 3,3073 \frac{1}{R} + 32,182, \text{ при } \tau=0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 6,2469 \frac{1}{R} + 44,951, \text{ при } \tau=0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 12,69 \frac{1}{R} + 56,33, \text{ при } \tau=0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.5), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкостей на стінці каналу виходячи з (2.6), що показана на рис. 2.20.

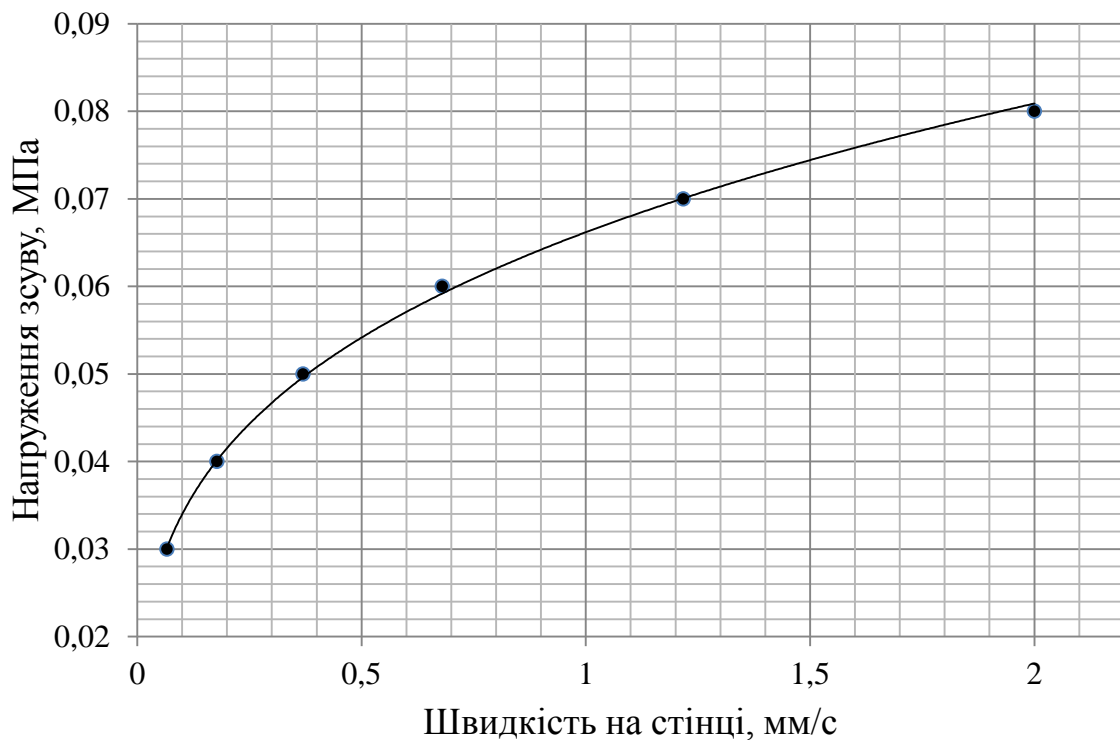


Рисунок 2.20 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПС-С-1-3

Як видно з графіку, зображеного на рис. 2.20, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом:

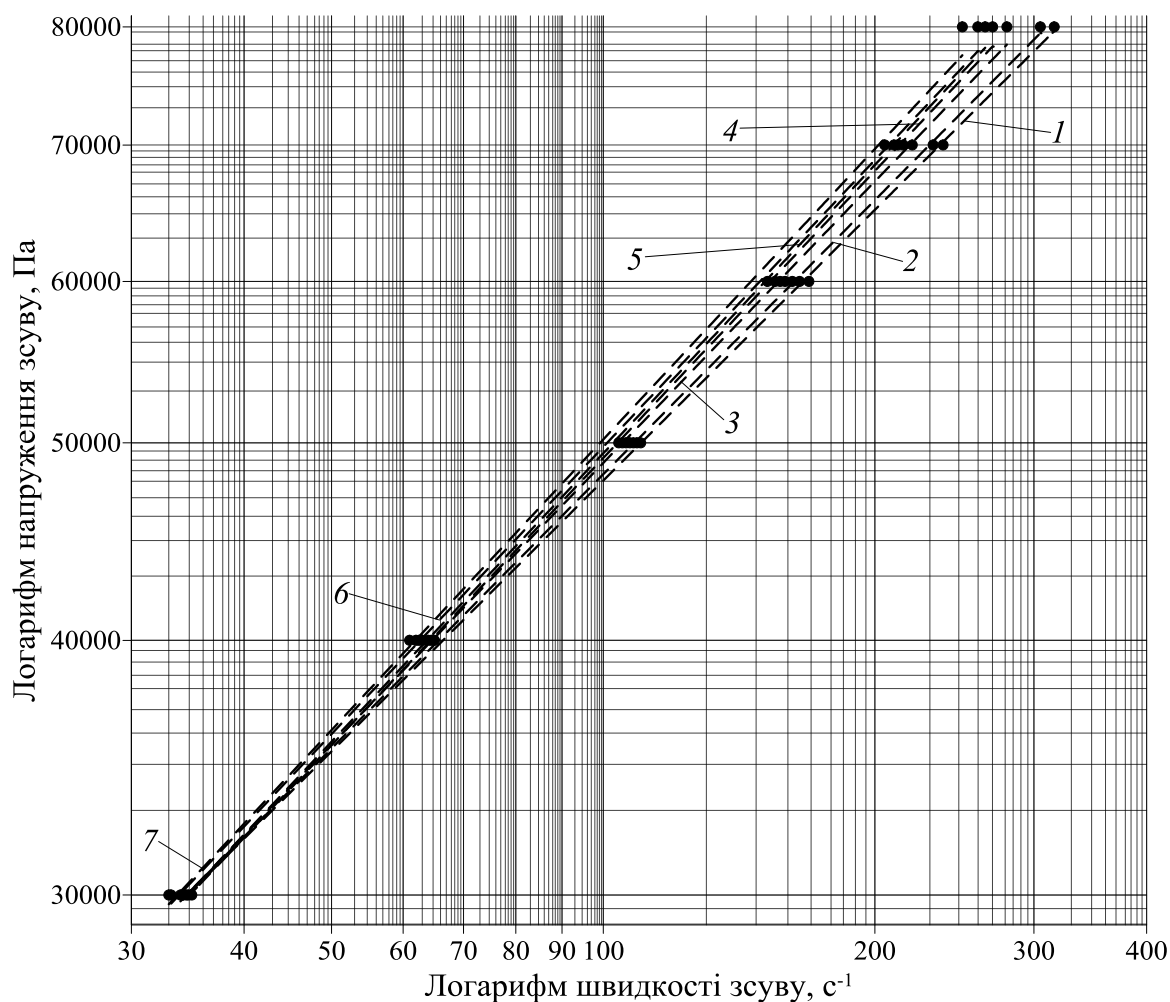
$$\tau = 4,403 \cdot 10^5 v_{\text{КОВЗ}}^{0,276},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.6 Полістирол ПС-С-1-3 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105

Виходячи з даних, отриманих шляхом дослідження течії ПС-С-1-3 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWN-105 на 7-ми діаметрах капілярів при різних напруженнях зсуву побудовано графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву, зображений на рис.

2.21.



Діаметр капіляру: 1 – 1 мм; 2 – 1,18 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,095 мм; 6 – 2,5 мм; 7 – 3 мм.

Рисунок 2.21 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву при різних діаметрах каналу

З графіка рис.

2.21 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не співпадають між собою. Неінваріантний характер кривих залежності, згідно п. 2.2.1, свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів, згідно методики описаної у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час дослідів з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами при постійному напруженні зсуву (табл. 2.10).

Таблиця 2.10

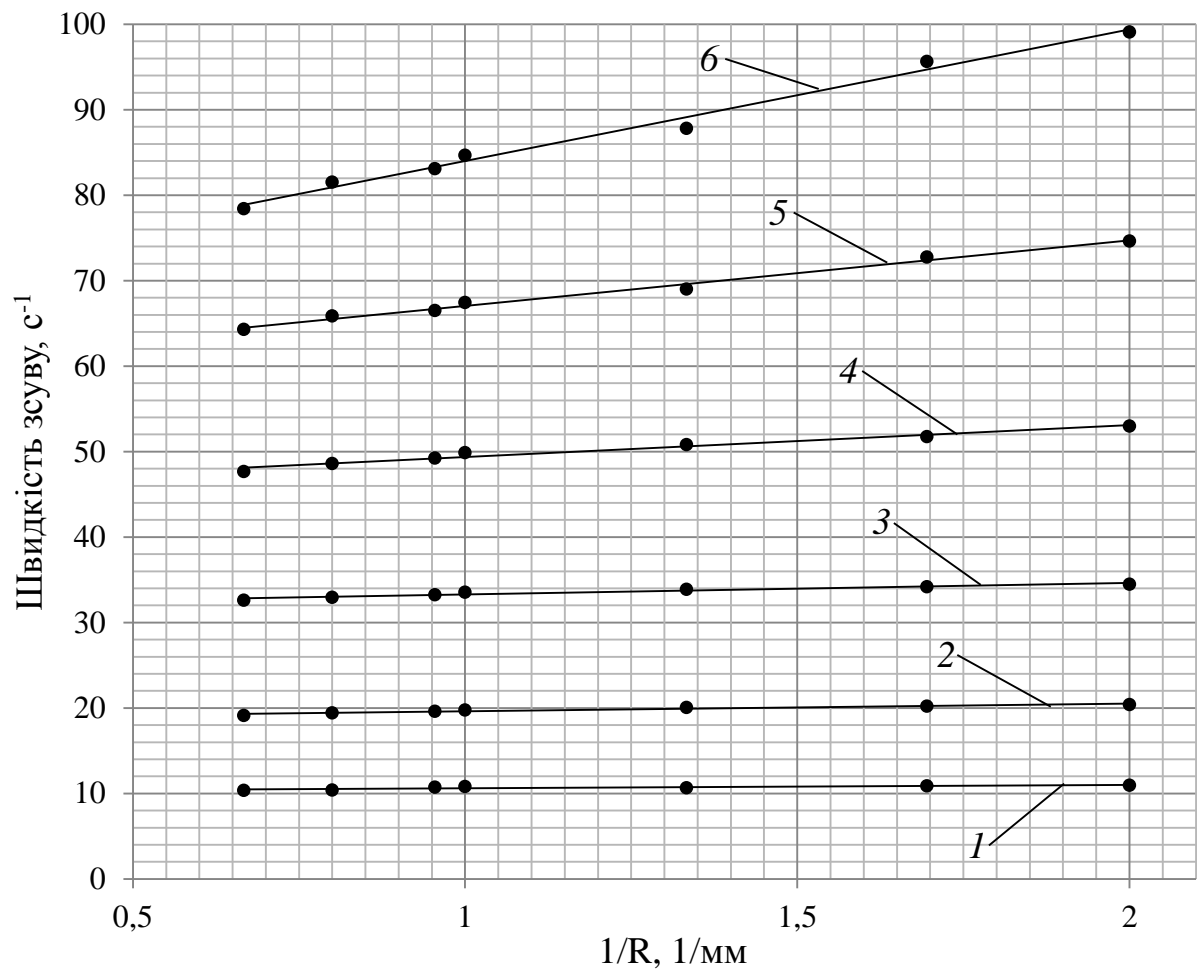
$D_{\text{кап}}, \text{ мм}$	$L_{\text{кап}}, \text{ мм}$	$m, \text{ кг}$	$\tau, \text{ Па}$	$\dot{\gamma}, \text{ с}^{-1}$
2,095	8	1,2	10781	10,55
2,095	16	2,4	10781	10,61

Як видно з табл. 2.10 швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, зображеного на рис. 2.21 визначається індекс течії ПС-С-1-3 зі змашувальним агентом:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,457.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, при різних напруженнях зсуву (рис. 2.22).



Напруження зсуву: 1 – 0,03 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,05 МПа; 4 – 0,06 МПа;
5 – 0,07 МПа; 6 – 0,08 МПа.

Рисунок 2.22 – Залежність середньоінтегральної швидкості зсуву від $1/R$ при різних напруженнях зсуву для ПС-С-1-3 зі змащувальним агентом

Виконавши лінійну апроксимацію точок, представлених на рис. 2.22, отримаємо наступні вирази:

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= 0,4002 \frac{1}{R} + 10,208, \text{ при } \tau=0,03 \text{ МПа}; \\ \dot{\gamma} &= 0,8796 \frac{1}{R} + 18,744, \text{ при } \tau=0,04 \text{ МПа}; \\ \dot{\gamma} &= 1,3371 \frac{1}{R} + 31,947, \text{ при } \tau=0,05 \text{ МПа};\end{aligned}$$

$$\dot{\gamma} = 3,7177 \frac{1}{R} + 45,653, \text{ при } \tau=0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 7,6644 \frac{1}{R} + 59,395, \text{ при } \tau=0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 15,38 \frac{1}{R} + 68,632, \text{ при } \tau=0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкостей на стінці каналу виходячи з (2.10), що показана на рис. 2.23.

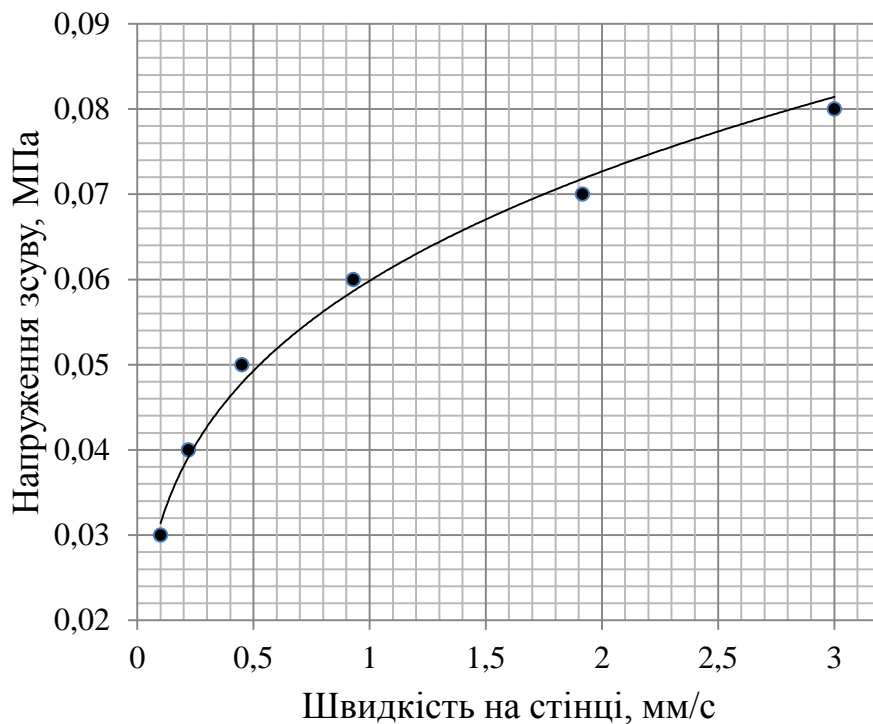


Рисунок 2.23 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПС-С-1-3 зі змащувальним агентом

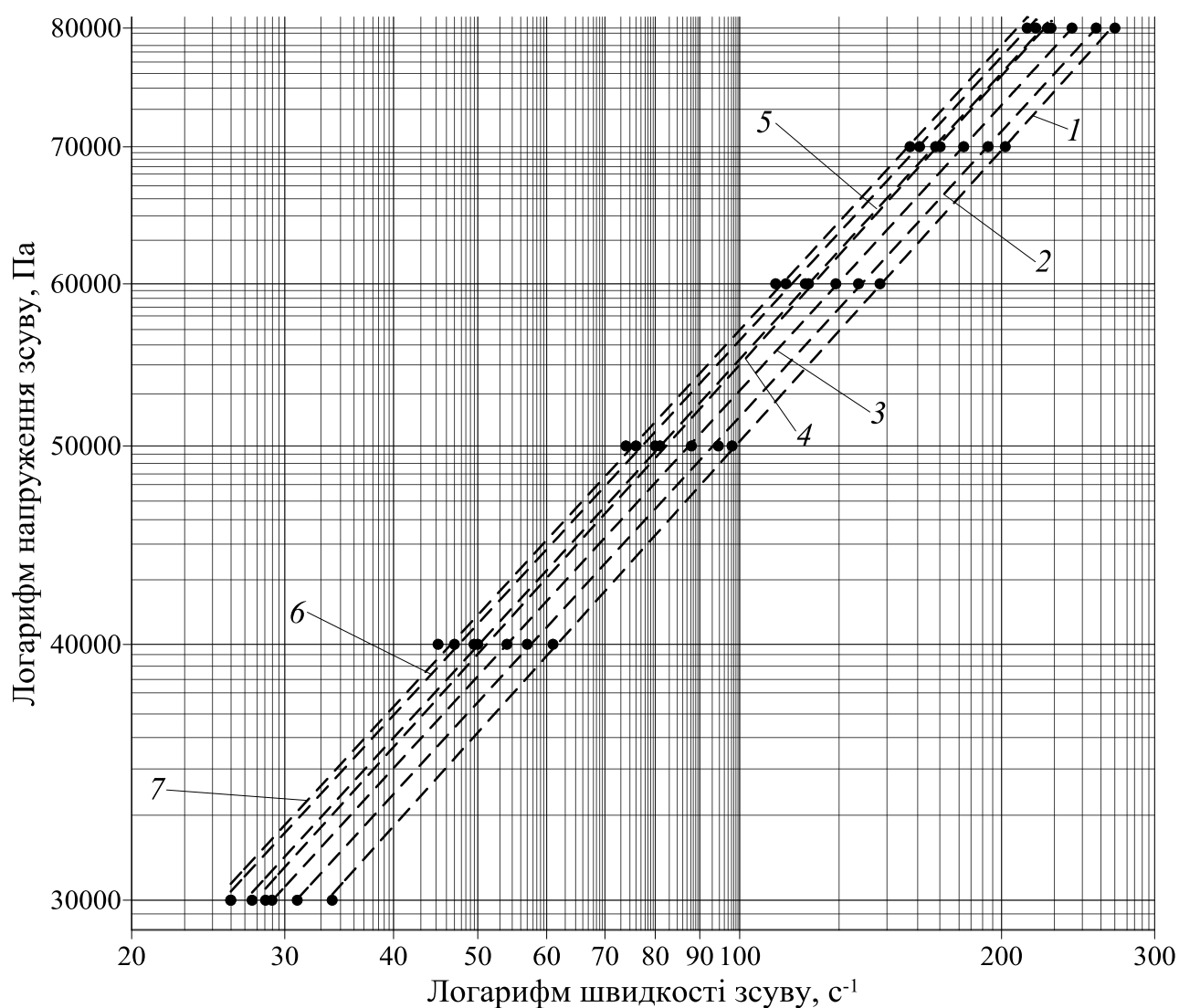
Як видно з графіку, зображеного на рис. 2.23, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом:

$$\tau = 4,145 \cdot 10^5 v_{\text{КОВЗ}}^{0,28},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.7 Полістирол ПС-С-1-3 вторинний

Виходячи з даних, отриманих шляхом дослідження течії вторинного ПС-С-1-3 на 7-ми діаметрах капілярів при різних напруженнях зсуву побудовано графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву, зображений на рис. 2.24.



Діаметр капіляру: 1 – 1 мм; 2 – 1,18 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,095 мм;
6 – 2,5 мм; 7 – 3 мм.

Рисунок 2.24 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву при різних діаметрах каналу

З графіка рис. 2.24 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не співпадають між собою. Неінваріантний характер кривих залежності, згідно п. 2.2.1, свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів, згідно методики описаної у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час дослідів з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами при постійному напруженні зсуву (табл. 2.11).

Таблиця 2.11

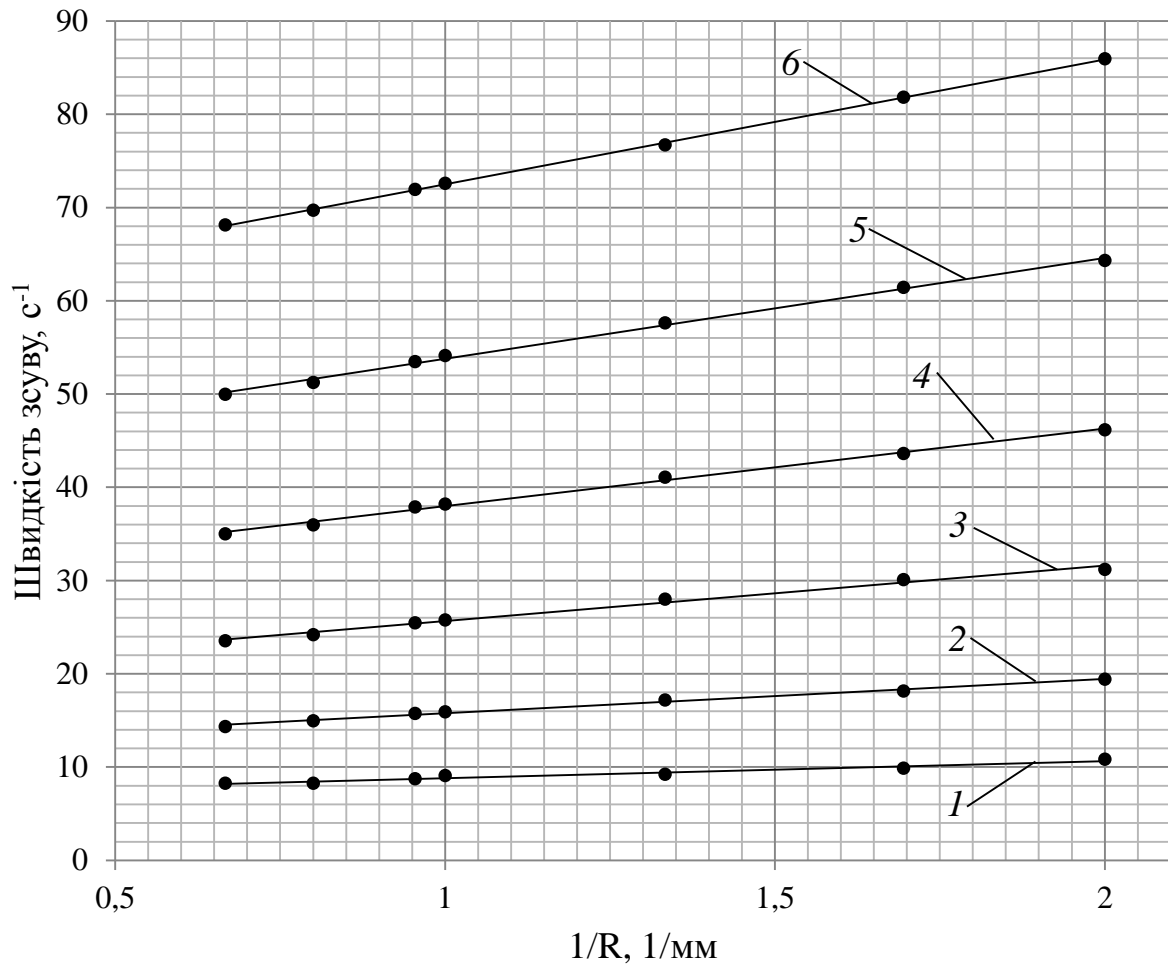
$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	6,32
2,095	16	2,4	10781	6,35

Як видно з табл. 2.11 швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, зображеного на рис. 2.24 визначається індекс течії вторинного ПС-С-1-3:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,467.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, при різних напруженнях зсуву (рис. 2.25).



Напруження зсуву: 1 – 0,03 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,05 МПа; 4 – 0,06 МПа;
5 – 0,07 МПа; 6 – 0,08 МПа.

Рисунок 2.25 – Залежність середньоінтегральної швидкості зсуву від $1/R$ при різних напруженнях зсуву для вторинного ПС-С-1-3

Виконавши лінійну апроксимацію точок, представлених на рис. 2.25, отримаємо наступні вирази:

$$\dot{\gamma} = 1,8183 \frac{1}{R} + 6,9915, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 3,6721 \frac{1}{R} + 12,098, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 5,9443 \frac{1}{R} + 19,724, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 8,3068 \frac{1}{R} + 29,674, \text{ при } \tau=0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 10,819 \frac{1}{R} + 42,968, \text{ при } \tau=0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 13,381 \frac{1}{R} + 59,111, \text{ при } \tau=0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкостей на стінці каналу виходячи з (2.10), показані на рис. 2.26.

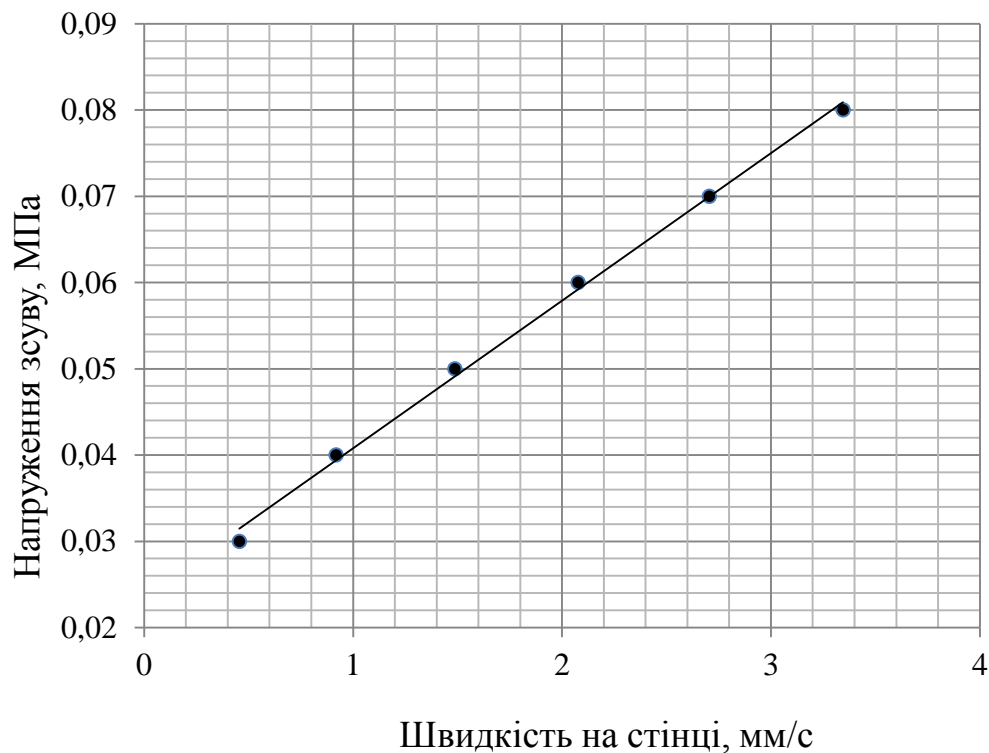


Рисунок 2.26 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для вторинного ПС-С-1-3

Як видно з графіку, зображеного на рис. 2.26, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має лінійний характер та описується виразом:

$$\tau = 1,711 \cdot 10^7 + 2,368 \cdot 10^4 v_{\text{КОВЗ}},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

Висновки. Проведене дослідження дозволяє встановити характер і величину пристінних ефектів для будь-яких полімерних матеріалів, що можуть бути описані степеневим законом.

2.5 Властивості матеріалу

Для підтвердження доцільності використання степеневого закону для опису залежності в'язкості від швидкості зсуву при течії розплаву полімерного матеріалу, виконується співставлення даних, отриманих експериментальним шляхом, та степеневій залежності в'язкості від швидкості зсуву.

2.5.1 Полістирол ПС-С-1-3

Для визначення залежності в'язкості від швидкості зсуву дані всіх експериментальних досліджень ПС-С-1-3 наносяться на графік, зображений на рис. 2.27.

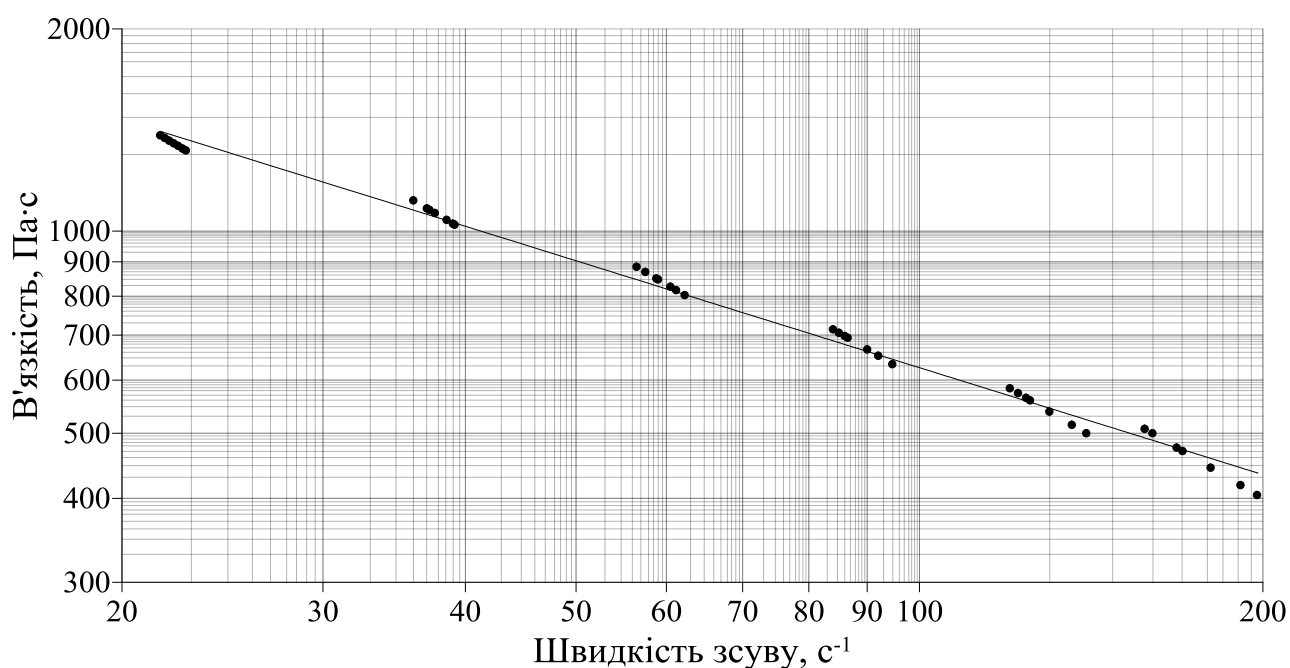


Рисунок 2.27 – Залежність в'язкості від швидкості зсуву для ПС-С-1-3

Апроксимуючи точки на графіку, зображеному на рис. 2.27, степеневою функцією отримаємо залежність в'язкості від швидкості зсуву, що описується виразом:

$$\eta = 7153\dot{\gamma}^{-0,53}.$$

Даний вираз може бути використаний при числовому моделюванні течії розплаву полімерного матеріалу.

2.5.2 Поліетилен високого тиску 15803-020

Для визначення залежності в'язкості від швидкості зсуву дані всіх експериментальних досліджень ПЕВТ 15803-020 наносяться на графік, зображений на рис. 2.28.

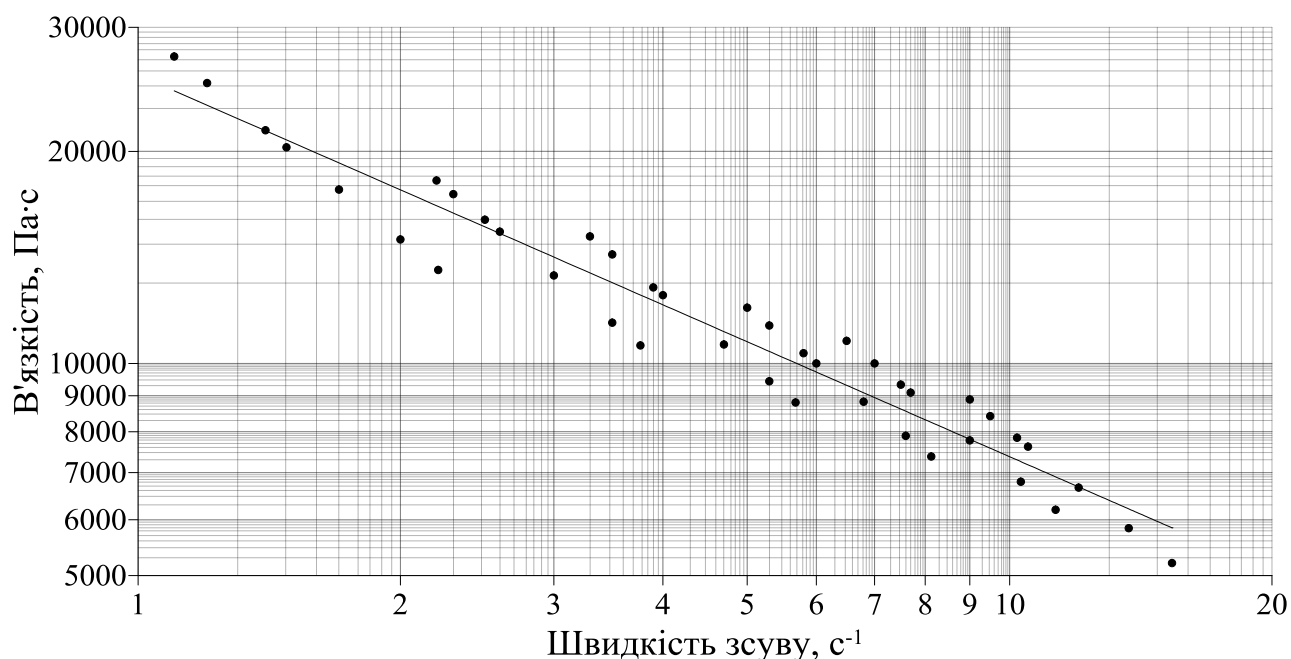


Рисунок 2.28 – Залежність в'язкості від швидкості зсуву для ПЕВТ 15803-020

Апроксимуючи точки на графіку, зображеному на рис. 2.28, степеневою функцією отримаємо залежність в'язкості від швидкості зсуву, що описується виразом:

$$\eta = 25674 \dot{\gamma}^{-0,54}.$$

Даний вираз може бути використаний при числовому моделюванні течії розплаву полімерного матеріалу.

2.5.3 Севілен 11104-030

Для визначення залежності в'язкості від швидкості зсуву дані всіх експериментальних досліджень севілену 11104-030 наносяться на графік, зображений на рис. 2.29.

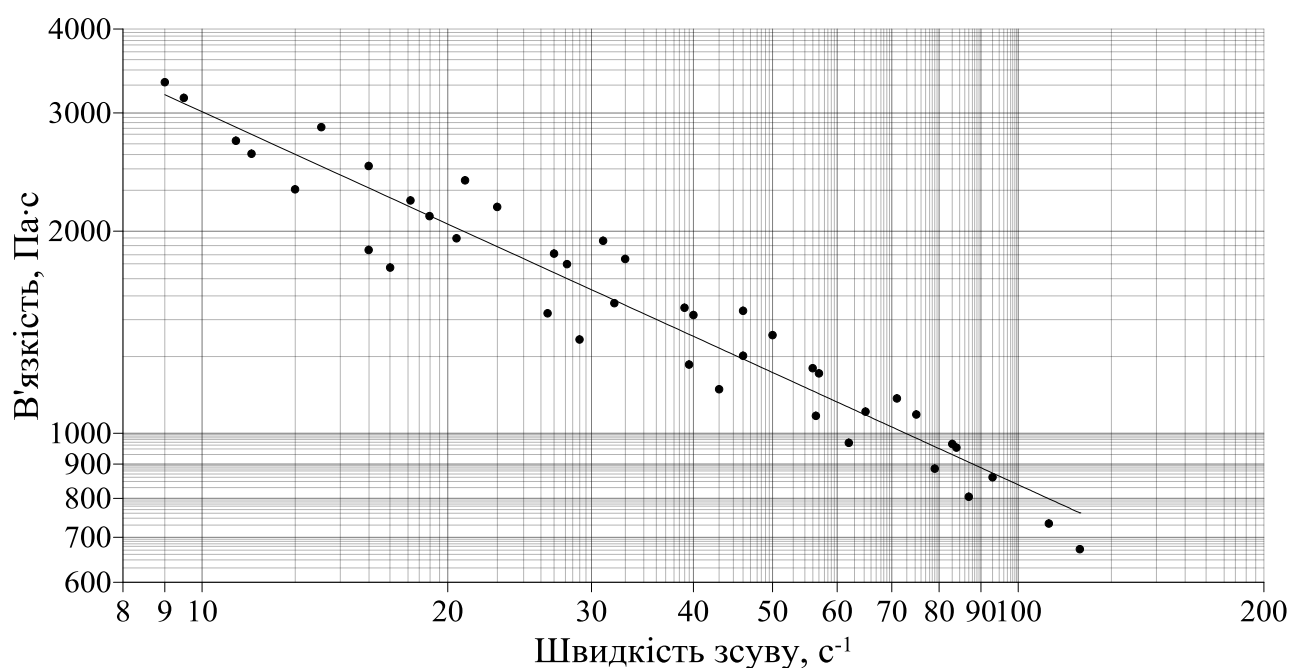


Рисунок 2.29 – Залежність в'язкості від швидкості зсуву для севілену 11104-030

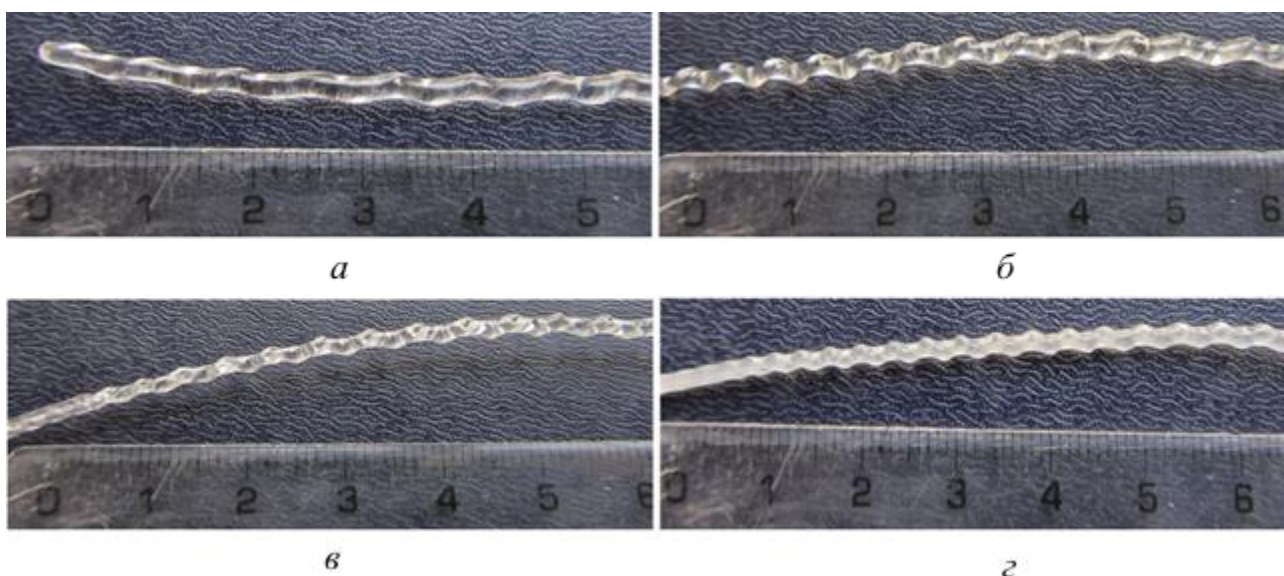
Аппроксимуємо точки на графіку, зображеному на рис. 2.29, степеневою функцією отримаємо залежність в'язкості від швидкості зсуву, що описується виразом:

$$\eta = 10821 \dot{\gamma}^{-0,56}.$$

Даний вираз може бути використаний при числовому моделюванні течії розплаву полімерного матеріалу.

2.6 Нестабільності потоку розплаву полімеру

Під час експериментальних досліджень при деяких режимах фіксувалися пульсації потоку розплаву полімеру продемонстровані на рис. 2.30.



a – ПС-С-1-3; *б, в* – ПЕВТ 15803-020; *г* – севілен 11104-030

Рисунок 2.30 – Нестабільності потоку

Пульсації потоку спостерігалися при швидкостях зсуву, що перевищували:

- для ПЕВТ 15803-020 – 20 с^{-1} ;
- для севілену 11104-030 – 200 с^{-1} ;
- для ПС-С-1-3 – 300 с^{-1} .

Причиною нестабільностей потоку є явище вискоеластичної турбуленції, що виникає за рахунок накопичення надлишкової вискоеластичної деформації.

У п. 4.1 та п. 4.2 запропоновано конструкції екструзійних головок, покликаних зменшити можливі пульсації потоку внаслідок вискоеластичної турбуленції.

2.7 Висновки

Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати дані про природу, характер, величину прістнних ефектів та параметри для завдання граничних умов при числовому моделюванні для досліджуваних полімерних матеріалів.

За результатами дослідження було опубліковано статті [102-105] та зроблено доповідь на науково-практичній конференції [106].

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ

3.1 Математична модель

При моделюванні процесу ізотермічної течії з урахуванням пристінних ефектів за основу взята узагальнена модель ньютонівської потоку [66, 107], що базується на вирішенні рівнянь імпульсу і нестисливості.

Рівняння нестисливості

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0.$$

Рівняння імпульсу

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i,$$

оскільки $t = \text{const}$ то рівняння матиме вигляд

$$\frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i.$$

Девіатор тензору деформації визначається

$$\tau_{ij} = \eta(\dot{\gamma}) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right).$$

Залежність в'язкості від швидкості зсуву виражена степеневим законом

$$\eta(\dot{\gamma}) = K (\lambda \dot{\gamma})^{n-1}.$$

Пристінні ефекти на стінці описуються за допомогою узагальненого закону Нав'є [62]

$$\tau = -F_{slip} |v_s - v_w|^{e_{slip}}, \quad (3.1)$$

де v_s – тангенціальна швидкість течії;

v_w – тангенціальна швидкість стінки;

F_{slip} та e_{slip} – параметри матеріалу.

Величини v_s , F_{slip} та e_{slip} знайдені на основі обробки експериментальних даних, наведеної у п. 2.4, і використовуються при числовому моделюванні.

Враховуючи, що пристінні ефекти можуть проявляти себе за рахунок ковзання по стінці або за рахунок утворення низькомолекулярного шару, встановлення параметрів матеріалу для узагальненого закону Нав'є відрізняється в залежності від природи пристінних ефектів.

3.2 Встановлення параметрів математичної моделі

3.2.1 Геометричні параметри та скінченноелементна сітка

Моделювання проводилося на таких типах каналів:

- циліндричному, з метою підтвердження адекватності експериментальних даних;
- конічному, з метою визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів;
- прямокутному, з метою визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів;
- геометрії формуючої головки, з метою оцінки величини впливу пристінних ефектів.

Циліндричний канал для перевірки адекватності експериментальних даних реалізовано у вигляді двовимірної осесиметричної моделі (рис. 3.1), що має радіус 1,0475 мм та довжину 16 мм. Канал розбитий на 4020 скінченних елементів.

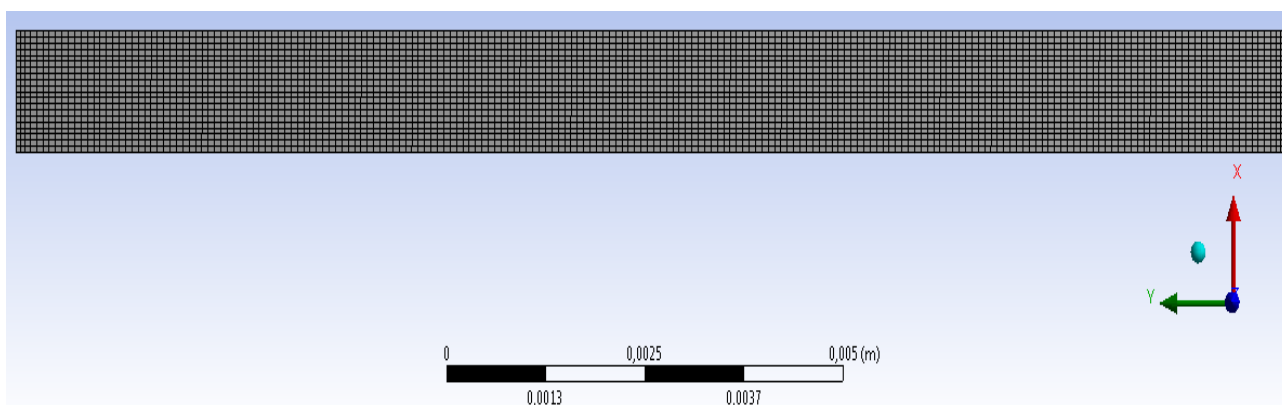


Рисунок 3.1 – Скінченно-елементна модель циліндричного каналу

Конічний канал для визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів реалізовано у вигляді двовимірної осесиметричної моделі, що має параметрично задані радіус входу, радіус виходу та довжину. Схему каналу зображено на рис. 3.2. Канал розбитий на 4020 скінченних елементів.

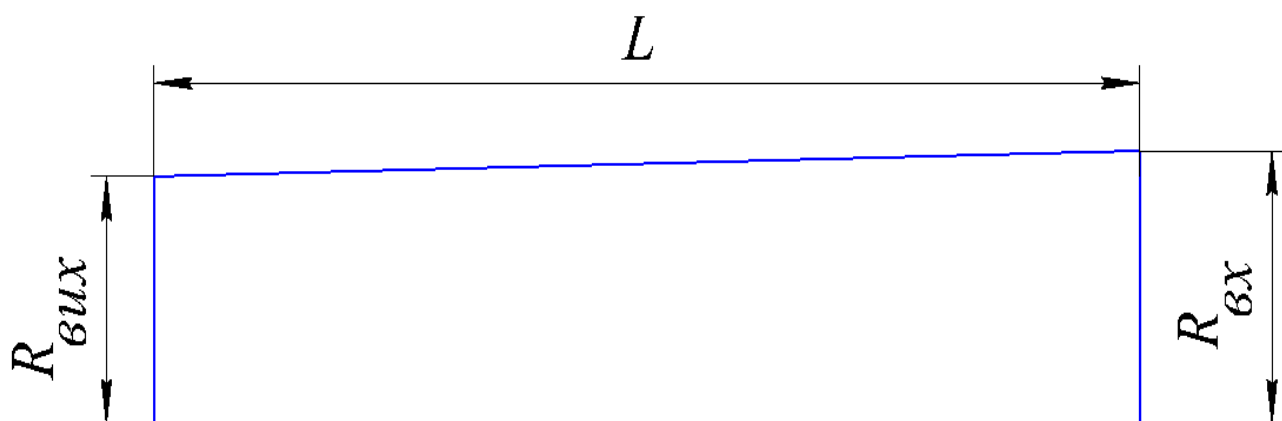


Рисунок 3.2 – Схема конічного каналу

Канал з прямокутною геометрією для визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів реалізовано у вигляді тривимірної моделі (рис. 3.3), що має параметрично задані ширину, висоту та довжину. Канал розбитий на 14520 скінченних елементів.

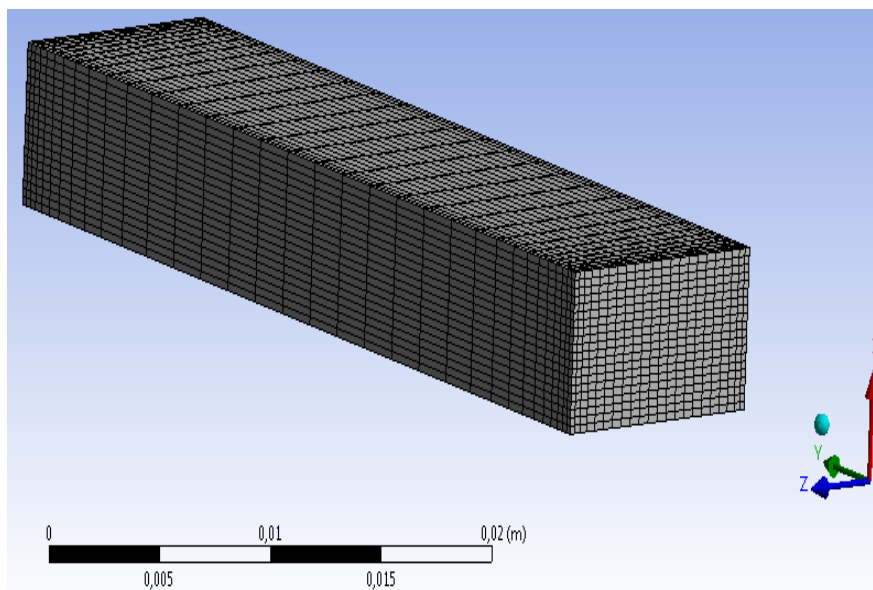


Рисунок 3.3 – Скінченно-елементна модель прямокутного каналу

Канал з геометрією формуючої головки для визначення величини впливу пристінних ефектів на параметри процесу реалізовано у вигляді тривимірної моделі симетричної четверті формуючої голівки (рис. 3.4). Канал розбитий на 339766 скінченних елементів.

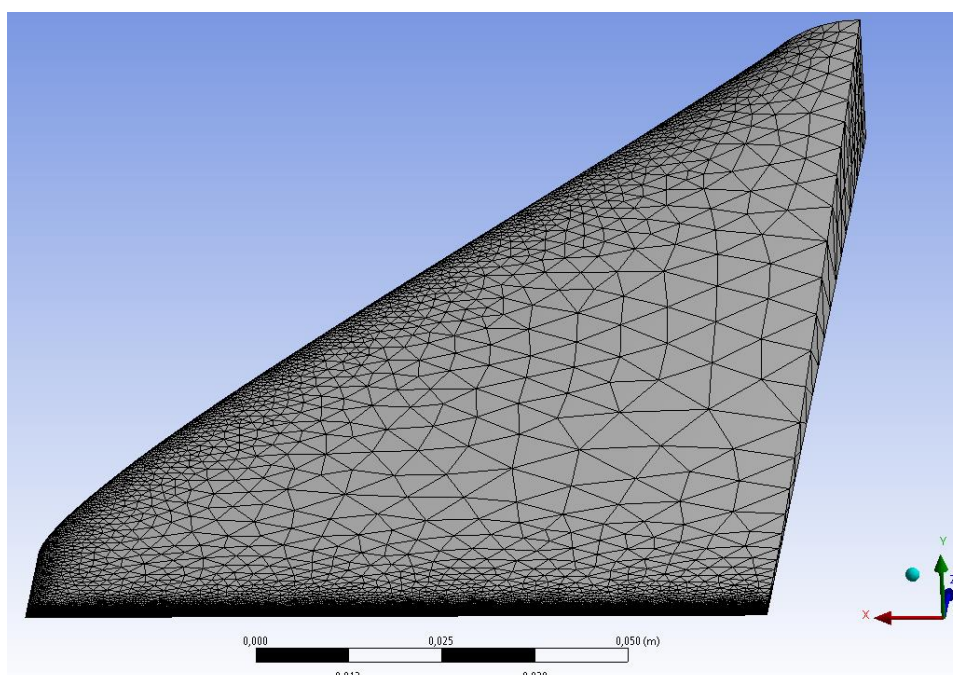


Рисунок 3.4 – Скінченно-елементна модель каналу з геометрією формуючої головки

3.2.2 Граничні умови математичної моделі

При математичному моделюванні течії полімерних матеріалів використовувалися такі граничні умови:

Вхід у канал – об'ємна витрата;

Вихід з каналу – відсутність тиску;

Стінки каналу – ковзання на стінці за допомогою узагальненого закону Нав'є (3.1).

3.2.3 Дослідження збіжності сітки

З метою визначення мінімально необхідної розрахункової сітки для отримання якісного результату розрахунку проведено дослідження збіжності сітки. Для задач течії по каналах найбільш характерним параметром є перепад тиску, який використано в якості контрольного параметра.

Дослідження збіжності сітки для циліндричного каналу проводилося співставленням перепадів тиску при різних значеннях кількості елементів по радіусу поперечного перетину. Результати дослідження зображено на рис. 3.5.

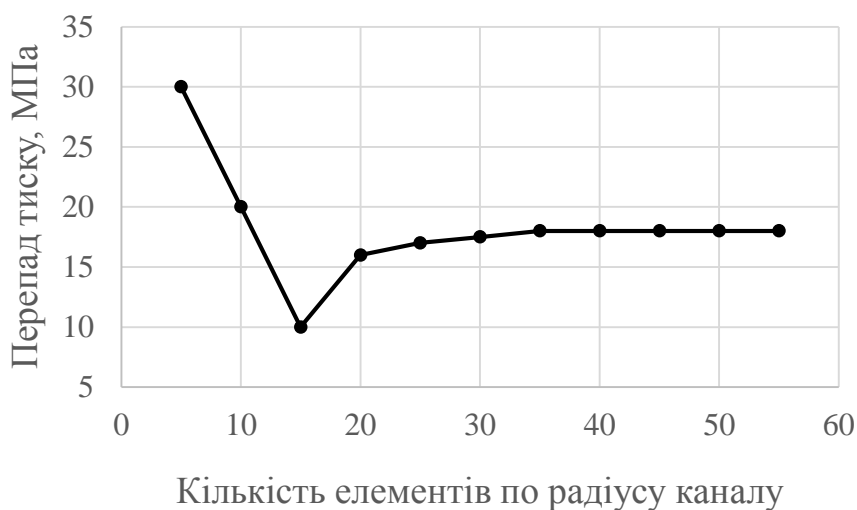


Рисунок 3.5 – Залежність перепаду тиску від кількості елементів по радіусу каналу

Як видно з рис. 3.5 збільшення густини сітки більше 30 елементів впливає на перепад тиску несуттєво.

Густина сітки для конічного каналу була використана така ж, як і для циліндричного, так як конічний канал є частинним випадком циліндричного.

Дослідження збіжності сітки для прямокутного каналу проводилося співставленням перепадів тиску при різних значеннях кількості елементів по ширині та висоті поперечного перетину. Результати дослідження зображено на рис. 3.6.



Рисунок 3.6 – Залежність перепаду тиску від кількості елементів по перетину каналу

Як видно з рис. 3.6 збільшення густини сітки більше 1600 елементів впливає на перепад тиску несуттєво.

Дослідження збіжності сітки для геометрії формуючої головки проводилося співставленням перепадів тиску при різних значеннях граничних розмірів елемента. Результати дослідження зображено на рис. 3.7.

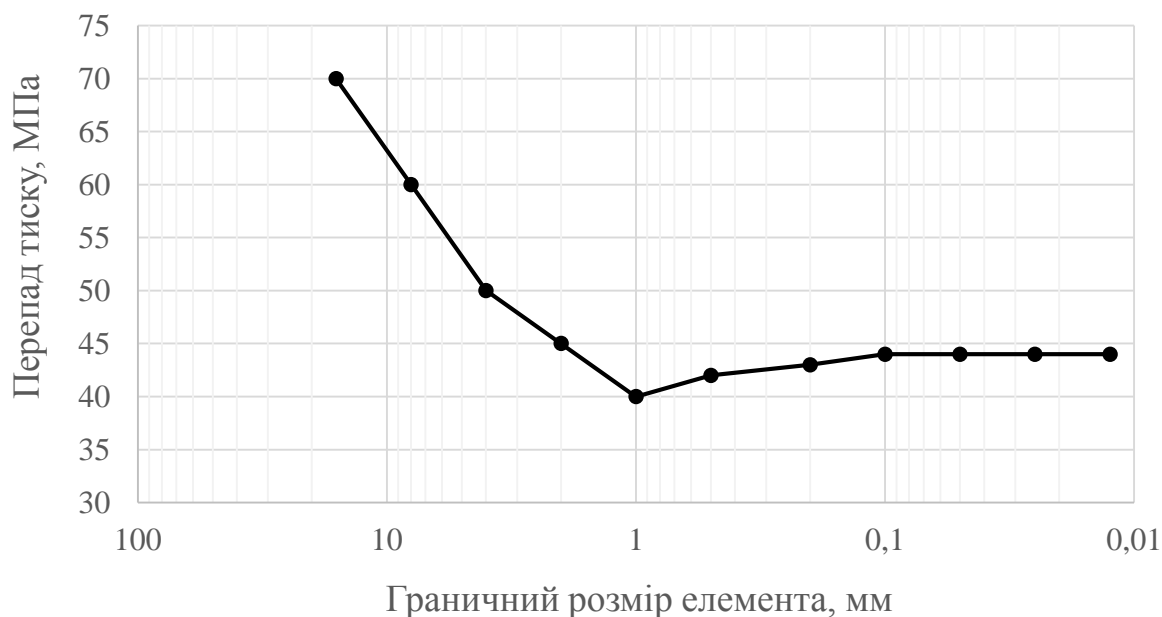
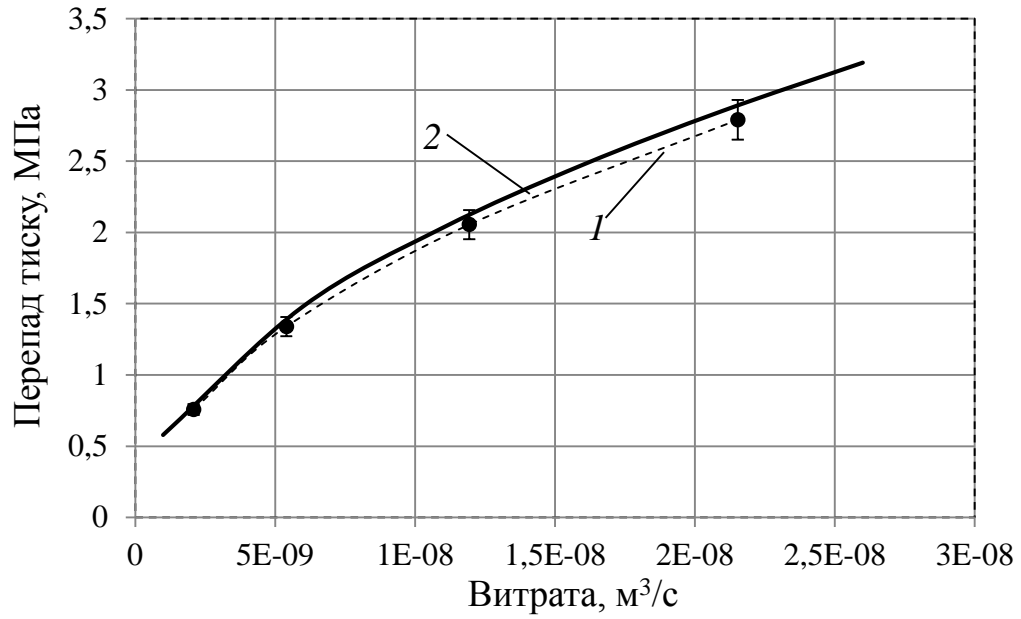


Рисунок 3.7 – Залежність перепаду тиску від граничного розміру елемента

Як видно з рис. 3.7 зменшення розміру елемента менше 0,1 мм впливає на перепад тиску несуттєво.

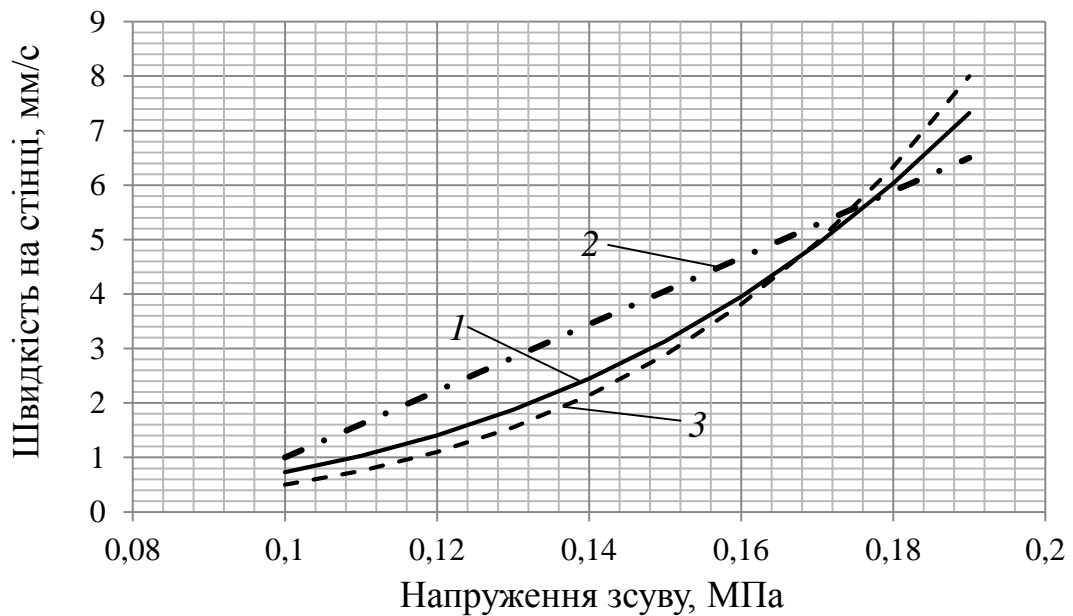
3.2.4 Підтвердження адекватності моделі

Для підтвердження адекватності обраної математичної моделі та граничних умов було проведено моделювання на каналі, геометрія якого співпадає з геометрією одного з капілярів, що використовувалися при натурному експерименті. Результати моделювання представлені на рис. 3.8, для експериментальної кривої на графік нанесені планки похибок 5 % для оцінки розбіжності. Додатково було проведено співставлення з існуючими результатами досліджень [108, 109]. Результати співставлення представлені на рис. 3.9.



1 – експериментальні дані; 2 – результати моделювання

Рисунок 3.8 – Порівняння залежностей перепаду тиску від витрати, отриманих експериментально та моделюванням з урахуванням пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020



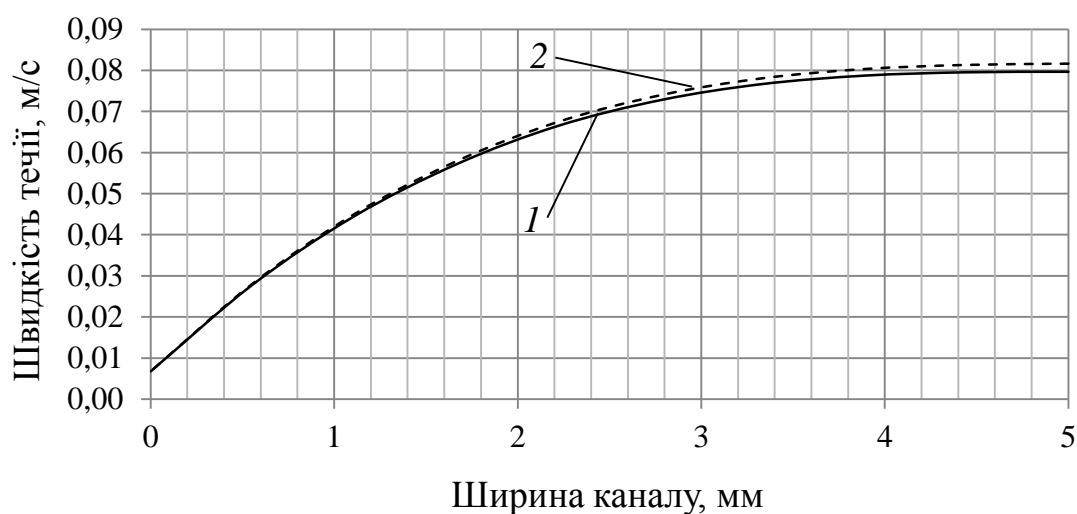
1 – результати моделювання; 2 – результати [108]; 3 – результати [109]

Рисунок 3.9 – Порівняння залежностей швидкості на стінці від напруження зсуву з існуючими результатами для ПЕВТ 15803-020

Як видно з рис. 3.8, дані, отримані при моделюванні відрізняються від експериментальних не більше ніж на 5 %, а у порівнянні з існуючими результатами не більше ніж на 20 %, що пояснюється різним підходом до визначення параметрів матеріалу, граничних умов та відмінностей у математичних моделях. Прийнятне співпадіння з експериментальними даними та існуючими результатами свідчить про адекватність моделі.

3.2.5 Підтвердження адекватності ізотермічного припущення

Адекватність ізотермічного припущення перевірялась числовим розрахунком для ізотермічного режиму і з урахуванням дисипації за постійної температури стінок. Результати моделювання наведено на рис. 3.10.



1 – ізотермічна течія; 2 – неізотермічна течія

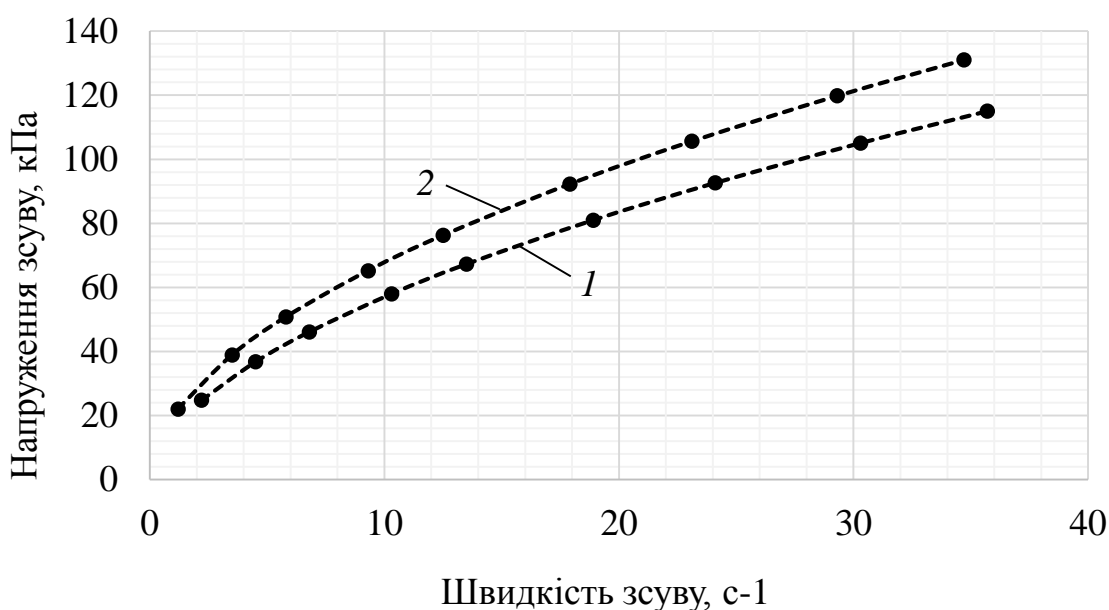
Рисунок 3.10 – Порівняння швидкостей по ширині каналу, отриманих моделюванням для ізотермічного та неізотермічного режимів

Як видно з рис. 3.10, дані, отримані при моделюванні відрізняються від експериментальних не більше ніж на 4 %, що підтверджує можливість ізотермічних розрахунків.

3.2.6 Підтвердження адекватності екстраполяції результатів досліджень на некруглі канали

З метою підтвердження адекватності екстраполяції результатів, отриманих у експериментальних дослідженнях з циліндричними каналами на інші типи каналів було проведено додатковий дослід з капіляром прямокутної форми, гідравлічний діаметр якого співпадав з одним із досліджуваних капілярів.

Залежності напруження зсуву від швидкості зсуву для циліндричних каналів круглого та прямокутного перерізів зображені на рис. 3.11.



1 – циліндричний канал; 2 – прямокутний канал

Рисунок 3.11 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву для циліндричних каналів круглого та прямокутного перерізів для ПЕВТ 15803-020

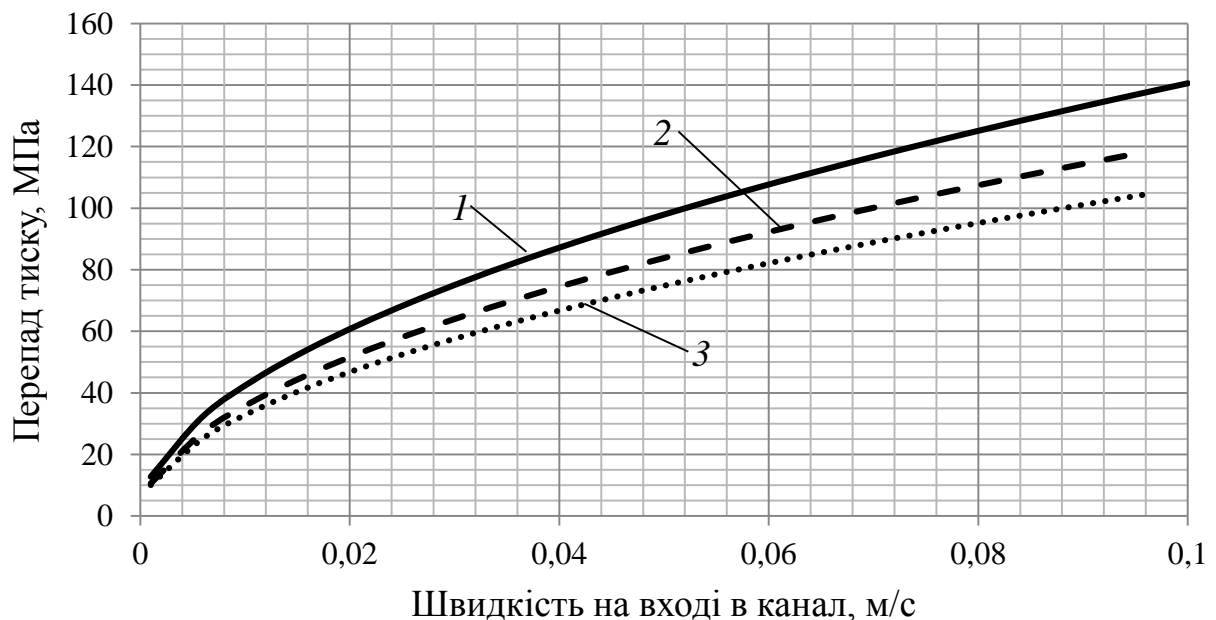
Як видно з рис. 3.11 при течії полімерного матеріалу крізь прямокутний канал в порівнянні з циліндричним має місце збільшення величини напружень зсуву на 15 %. Проте, це збільшення має величину, близьку до постійної у всьому діапазоні досліджуваних швидкостей зсуву.

Оскільки в результатах математичного моделювання враховується не абсолютні значення параметрів, а їх відносні величини, які є незмінні, то екстраполяція результатів, отриманих у експериментальних дослідженнях з циліндричними каналами на інші типи каналів є прийнятною.

3.3 Результати математичного моделювання

3.3.1 Результати моделювання каналу циліндричної геометрії

Для оцінки впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії для кожного з досліджуваних матеріалів було проведено три типи моделювання: без урахування пристінних ефектів (швидкість на стінці відсутня), з урахуванням ковзання на стінці та з урахуванням використання змащувального агенту. Результати моделювання течії ПЕВТ 15803-020 для діаметру каналу 0,5 мм зображено на рис. 3.12.

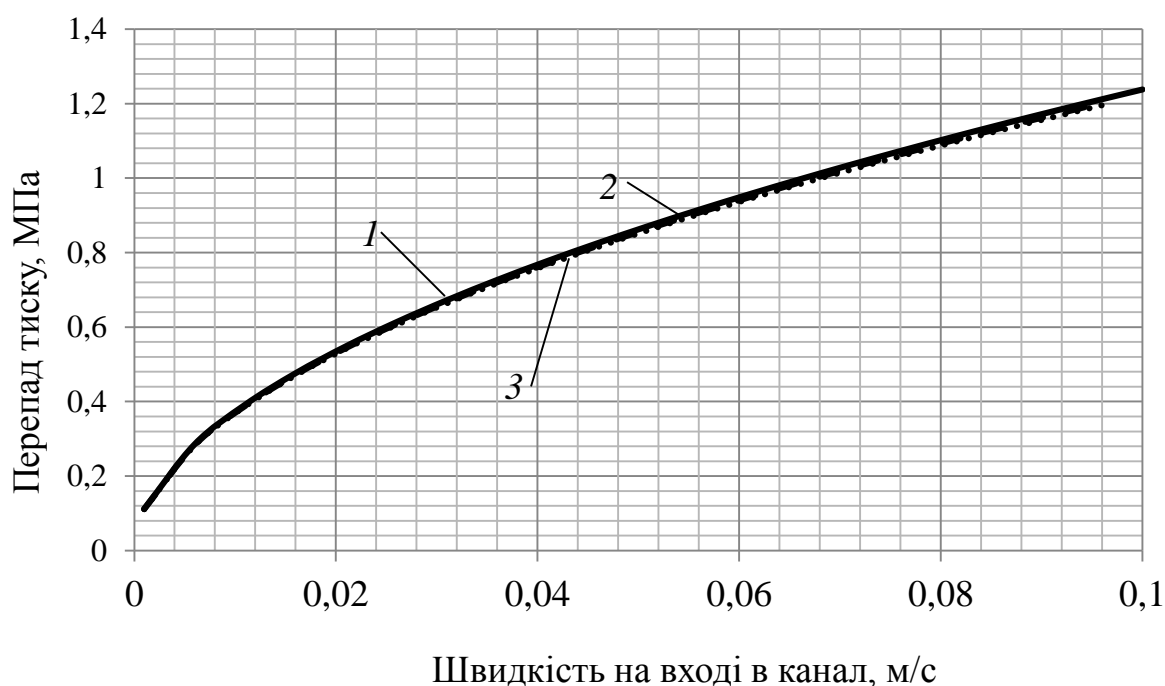


1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Рисунок 3.12 – Залежність перепаду тиску від швидкості на вході в канал при різних варіантах граничних умов на стінці при діаметрі каналу 0,5 мм

Як видно з рис. 3.12, відсутність врахування пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020 призводить до похибки у значенні перепаду тиску відносно врахування пристінних ефектів, величиною в 14 %, що може вносити істотні розбіжності при моделюванні переробного обладнання. Додавання змащувального матеріалу при цьому зменшує значення перепаду тиску ще на 11,5 %.

Для перевірки впливу діаметру каналу на величину похибки без врахування та з урахуванням пристінних ефектів було проведено моделювання для діаметру каналу 10 мм, результати якого зображено на рис. 3.13.



1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Рисунок 3.13 – Залежність перепаду тиску від швидкості на вході в канал при різних варіантах граничних умов на стінці при діаметрі каналу 10 мм

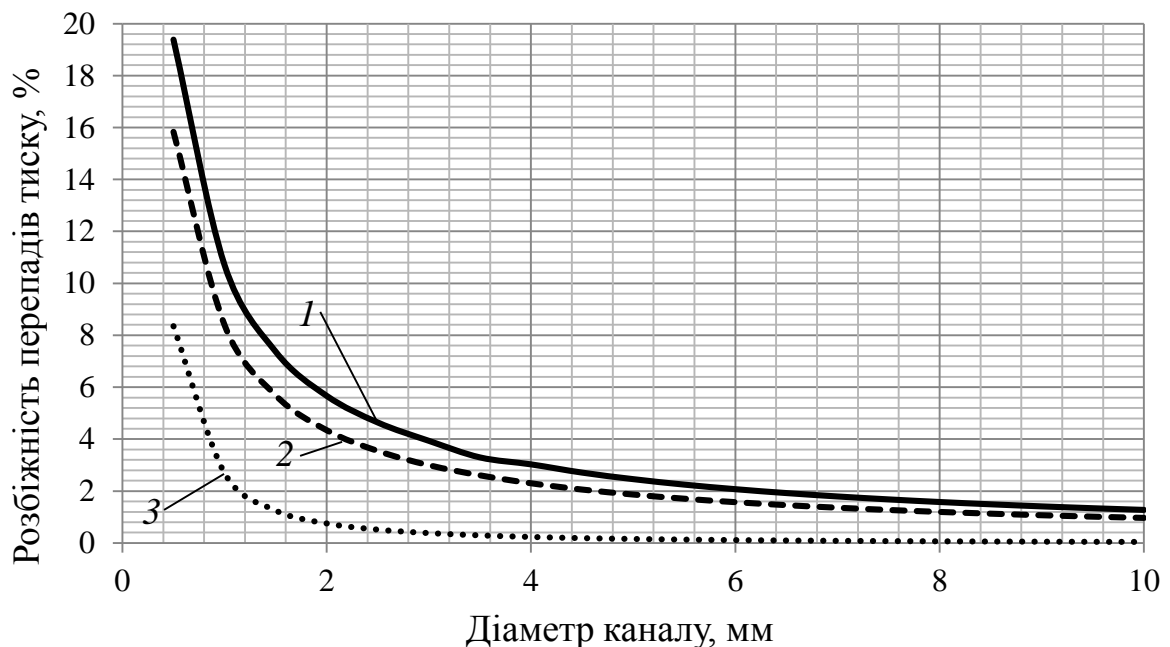
Як видно з рис. 3.13 значення перепаду тиску для варіантів течії без урахування пристінних ефектів, з їх урахуванням та з додатковим змащуванням відрізняються не більше, ніж на 1 %, що свідчить про зменшення впливу пристінних ефектів при збільшенні діаметру каналу.

Для визначення величини впливу діаметру каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням було проведено ряд аналогічних досліджень при різних діаметрах каналу в діапазоні від 0,5 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від діаметру каналу (рис. 3.14). При цьому розбіжність перепаду тиску визначаються

$$\Delta P_1 = \frac{|\Delta P_0 - \Delta P_{\text{пр}}|}{\Delta P_0} \cdot 100\%,$$

де $\Delta P_0 = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}$ – перепад тиску на вході та виході з каналу без врахування пристінних ефектів, Па;

$\Delta P_{\text{пр}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}$ – перепад тиску на вході та виході з каналу з врахуванням пристінних ефектів, Па.



1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

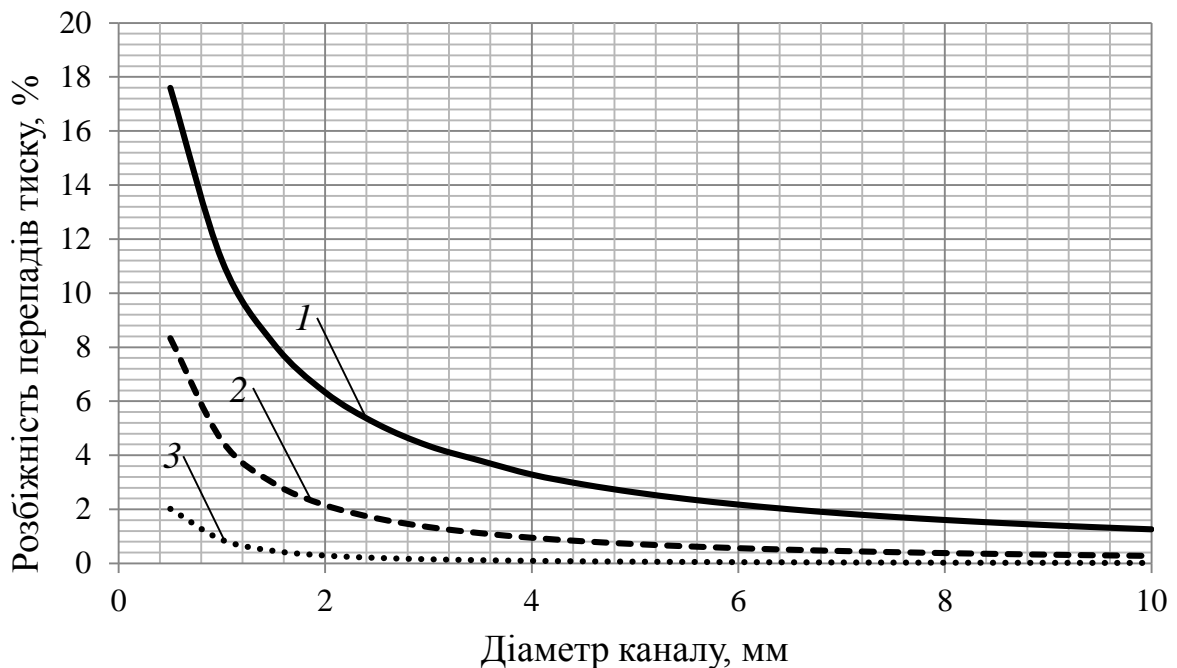
Рисунок 3.14 – Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від діаметру каналу

Як видно з рис. 3.14 залежності розбіжностей перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від діаметру каналу мають вигляд степеневого закону.

Для визначення величини впливу діаметру каналу на розбіжність у перепадах тисків при течії без змащування та зі змащуванням було проведено ряд досліджень при різних діаметрах каналу в діапазоні від 0,5 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від діаметру каналу (рис. 3.15). При цьому розбіжність перепаду тиску визначаються

$$\Delta P_2 = \frac{|\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{змащ}}|}{\Delta P_{\text{пр}}} \cdot 100\%,$$

де $\Delta P_{\text{змащ}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}$ – перепад тиску на вході та виході з каналу з врахуванням додавання змащувального агента, Па.



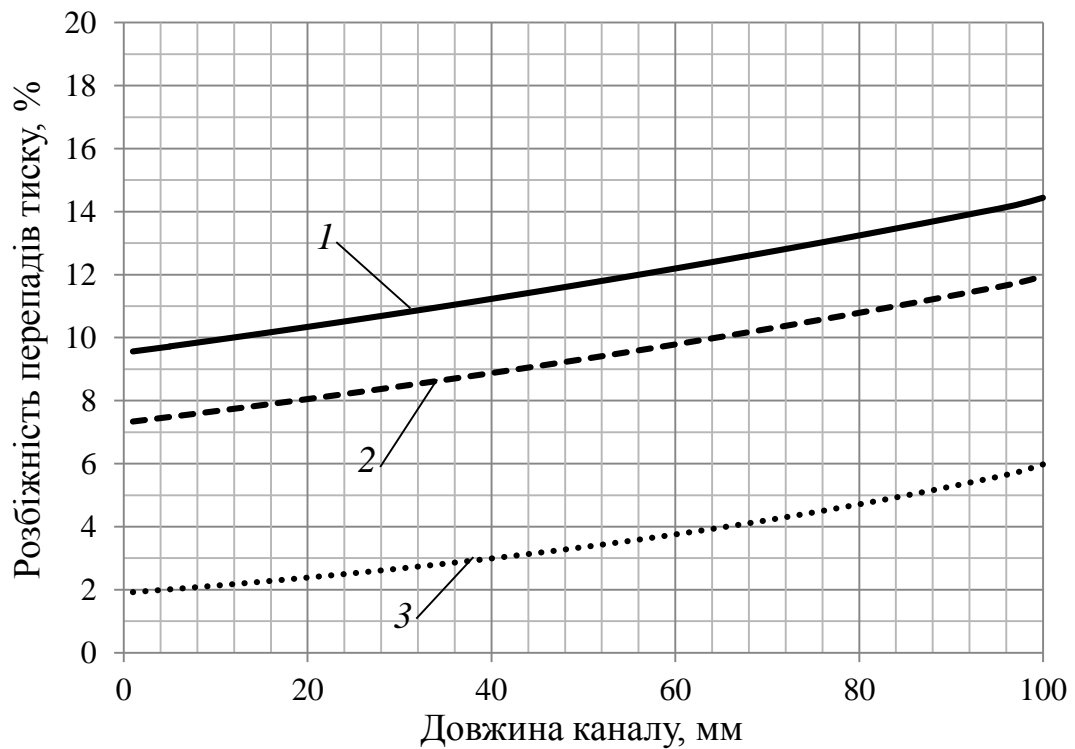
1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.15 – Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від діаметру каналу

Як видно з рис. 3.15 залежності розбіжностей перепадів тиску між течією без та зі змащувальним агентом від діаметру каналу мають вигляд степеневого закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів несуттєвий на діаметрах каналу, більших за 4 мм, та збільшується на каналах менших діаметрів, сягаючи 20 %.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням було проведено ряд досліджень при різних довжинах каналу в діапазоні від 1 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу (рис. 3.16).

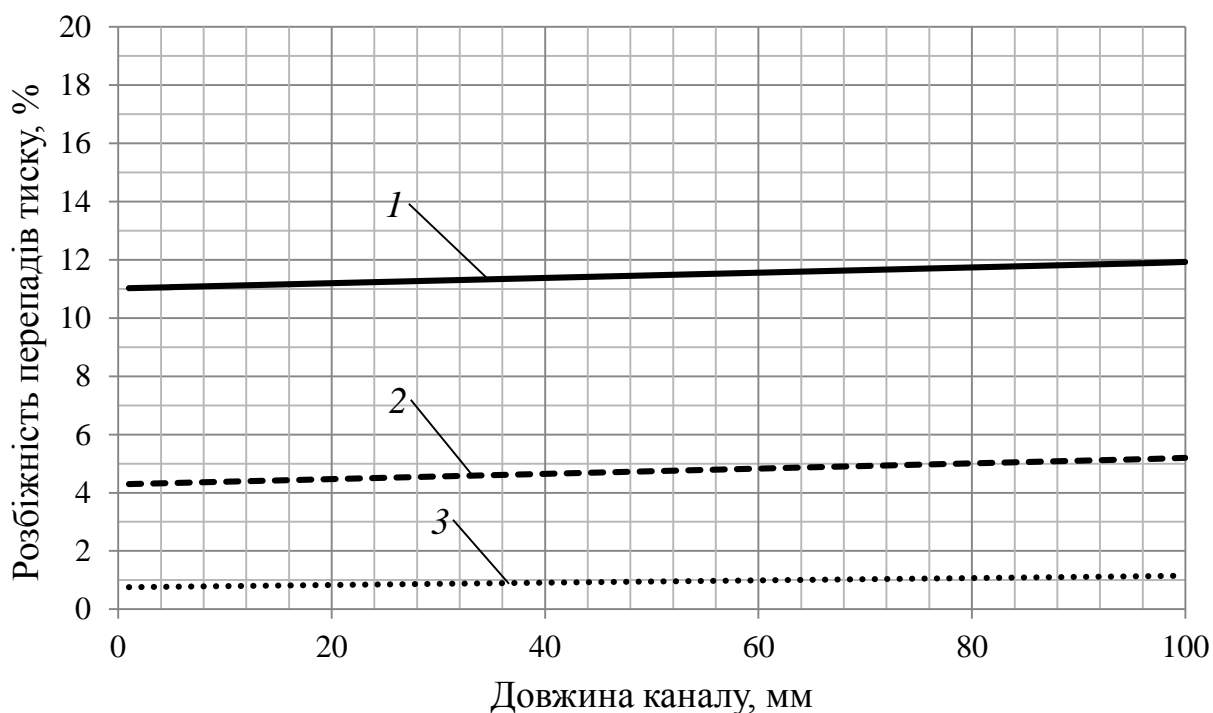


1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.16 – Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу

Як видно з рис. 3.16 залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від діаметру каналу має вигляд експоненційного закону.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків при течії без змащування та зі змащуванням було проведено ряд досліджень при різних довжинах каналу в діапазоні від 1 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу (рис. 3.17).



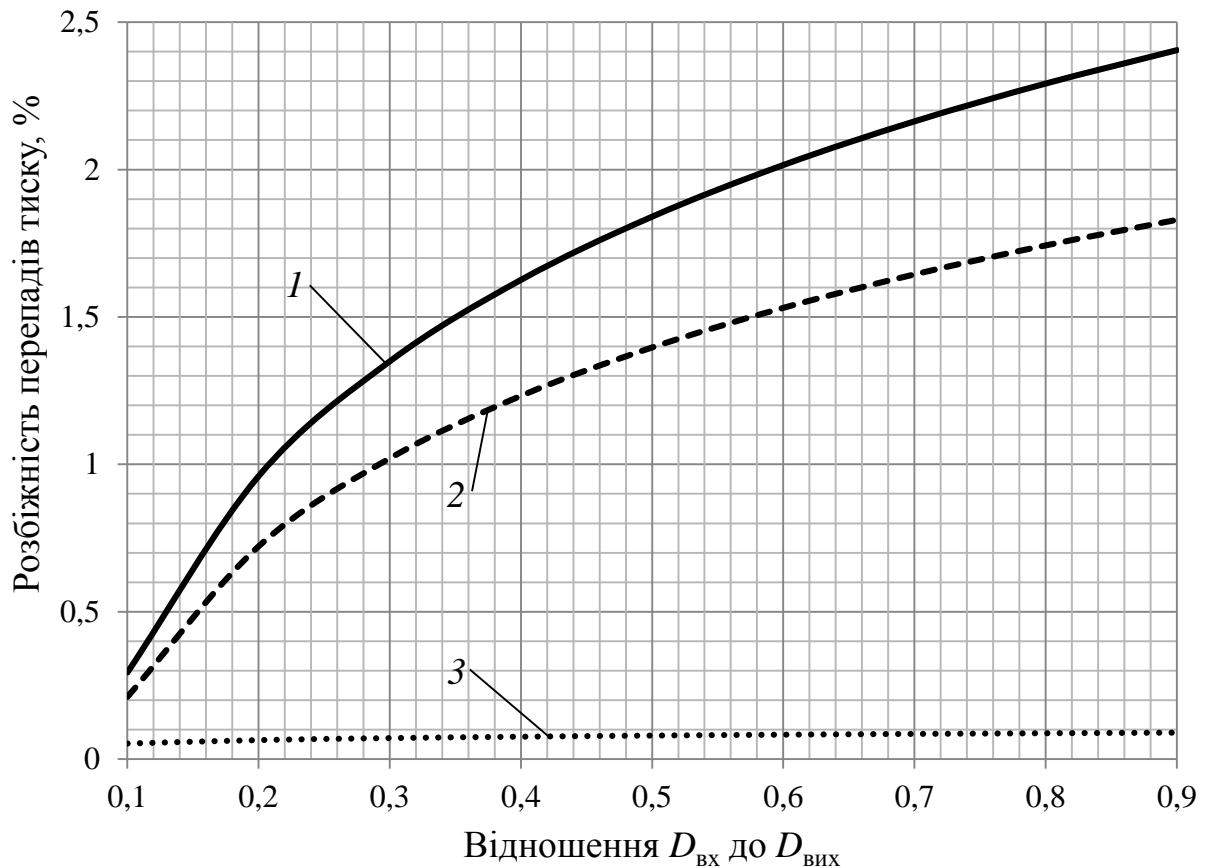
1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.17 – Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу

Як видно з рис. 3.17 залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від діаметру каналу має вигляд лінійного закону.

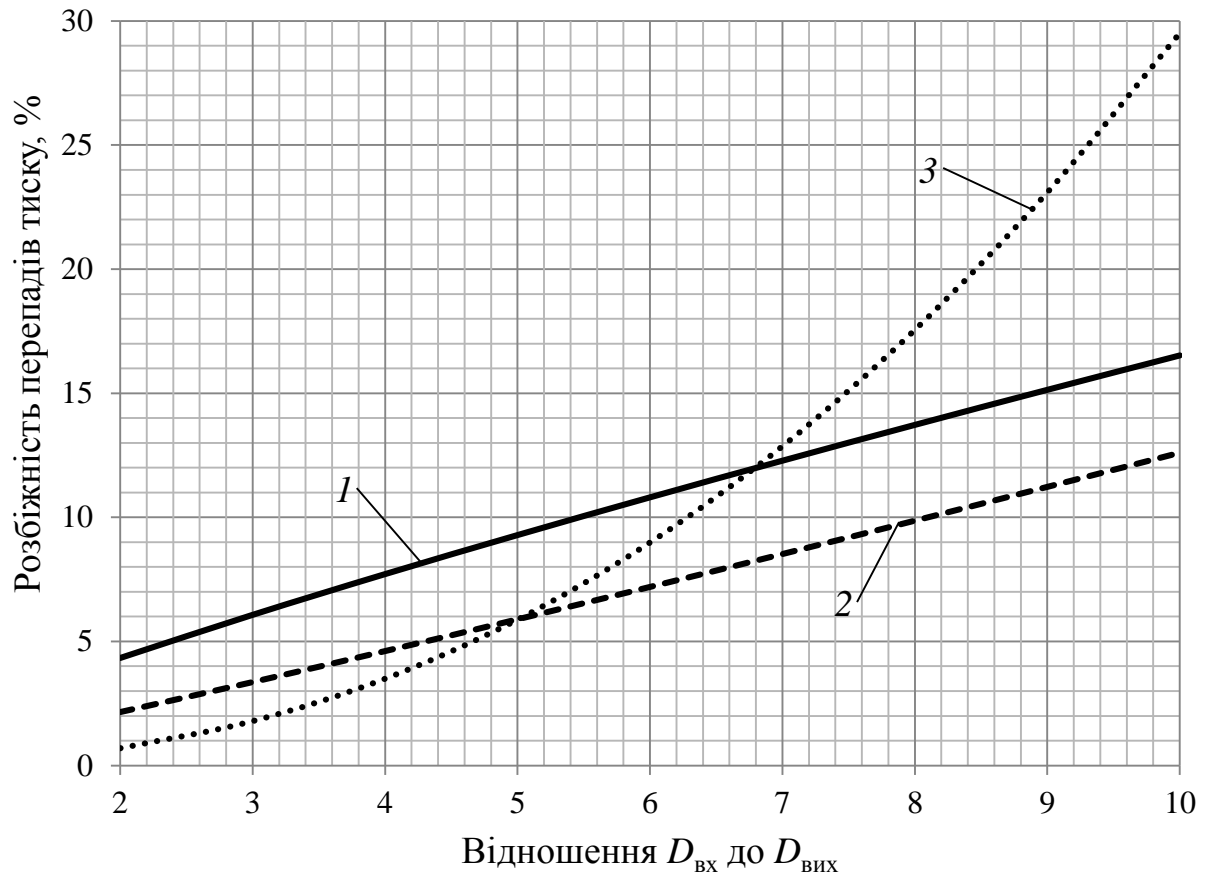
Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів не суттєвий на всьому діапазоні довжин каналів.

Для визначення величини впливу відношення діаметру входу до діаметру виходу ($D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$) каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням було проведено ряд досліджень при різних відношеннях $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу в діапазоні від 0,1 до 0,9 та від 2 до 10, що дозволило побудувати криві залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузора (рис. 3.18) та конфузора (рис. 3.19).



1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.18 – Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузора

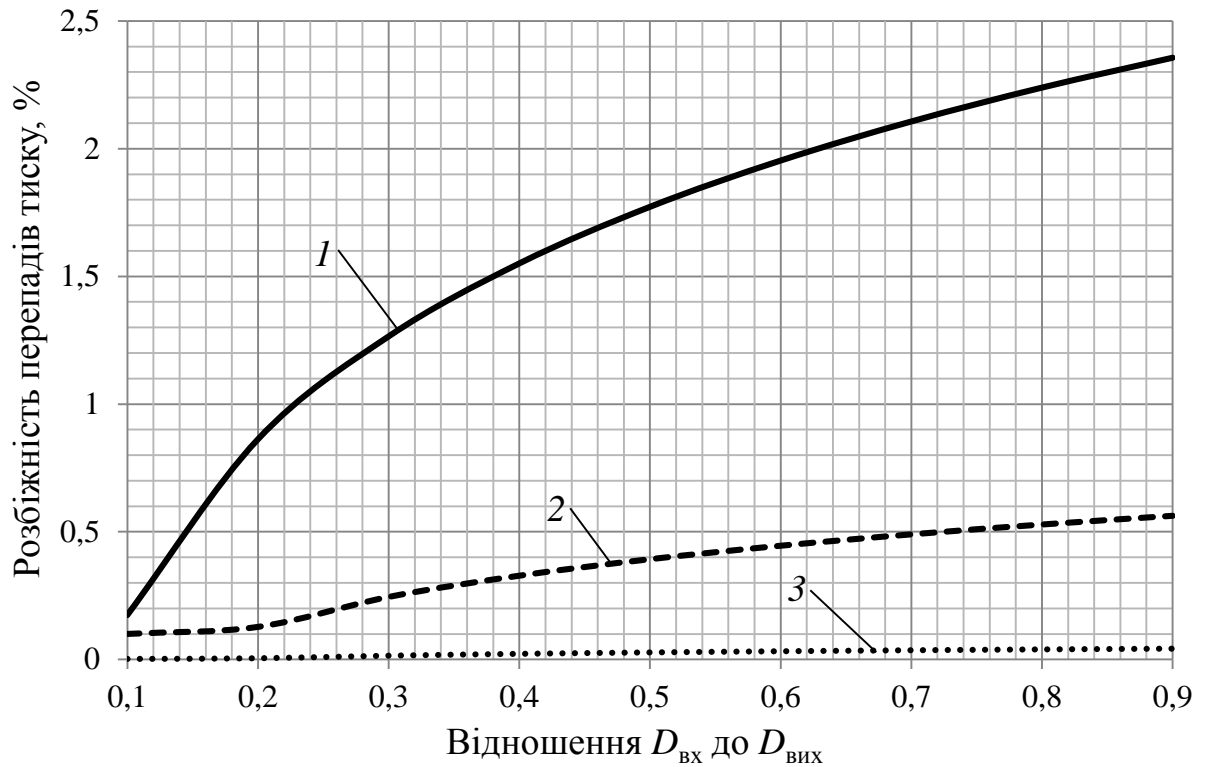


1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.19 – Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для конфузора

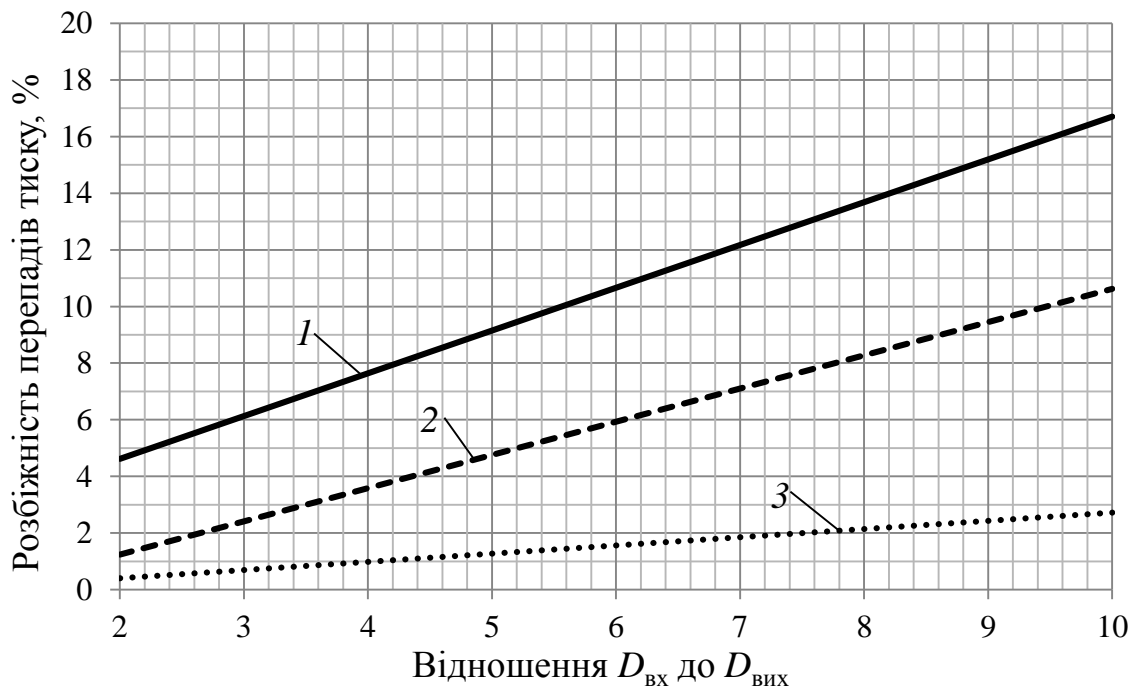
Як видно з рис. 3.18 залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузору має вигляд логарифмічного закону, а для конфузора, виходячи з рис. 3.19 – степеневого закону.

Для визначення величини впливу відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу на розбіжність у перепадах тисків при течії без змащування та зі змащуванням було проведено ряд досліджень при різних відношеннях $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу в діапазоні від 0,1 до 0,9 та від 2 до 10, що дозволило побудувати криві залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузора (рис. 3.20) та конфузора (рис. 3.21).



1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.20 – Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{вх}/D_{вих}$ каналу для дифузора



1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

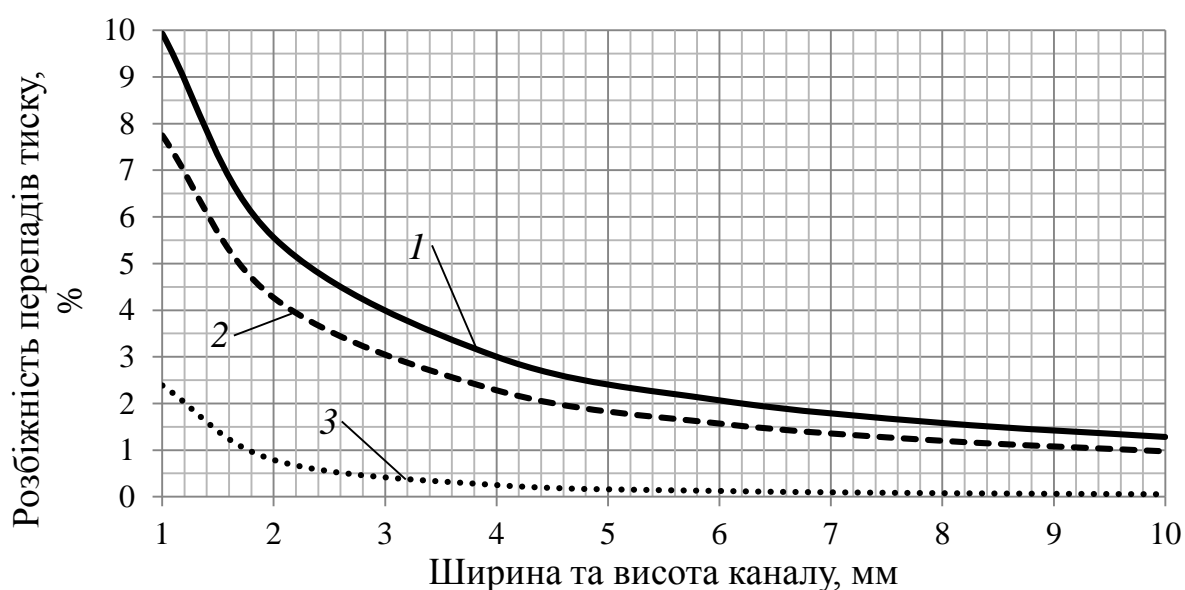
Рисунок 3.21 – Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{вх}/D_{вих}$ каналу для конфузора

Як видно з рис. 3.20 залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузору має вигляд логарифмічного закону, а для конфузора, виходячи з рис. 3.21 – лінійного закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів суттєвий при конфузорному виконанні каналу та несуттєвий при дифузорному виконанні.

3.3.2 Результати моделювання для каналу прямокутної геометрії

Для визначення величини впливу розмірів каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням було проведено ряд досліджень при різних ширинах та висотах каналу в діапазоні від 1 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від ширини та висоти каналу (рис. 3.22).

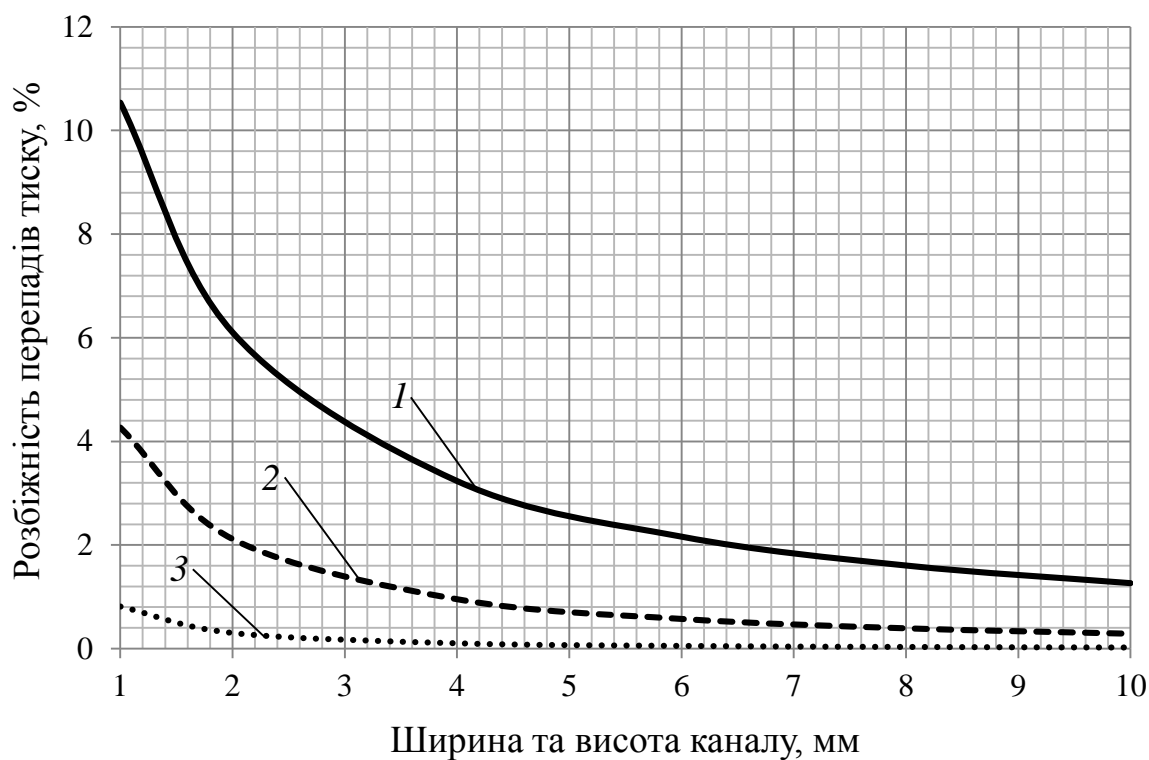


1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.22 – Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від ширини та висоти каналу

Як видно з рис. 3.22 залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від ширини та висоти каналу має вигляд степеневого закону.

Для визначення величини впливу ширини та висоти каналу на розбіжність у перепадах тисків при течії без змащування та зі змащуванням було проведено ряд досліджень при різних діаметрах каналу в діапазоні від 1 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від ширини та висоти каналу (рис. 3.23).



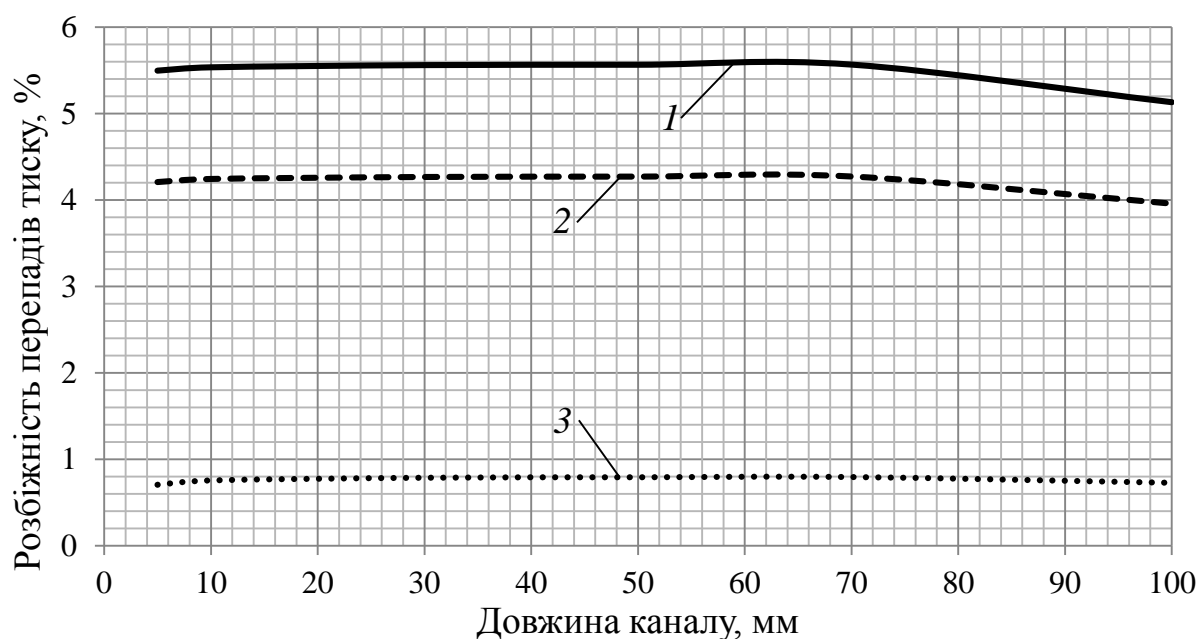
1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.23 – Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від ширини та висоти каналу

Як видно з рис. 3.23 залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від ширини та висоти каналу має вигляд степеневого закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів несуттєвий при розмірах каналу, більших за 5 мм, та збільшується на каналах менших діаметрів, сягаючи 10 %.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням було проведено ряд досліджень при різних довжинах каналу в діапазоні від 5 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу (рис. 3.24).



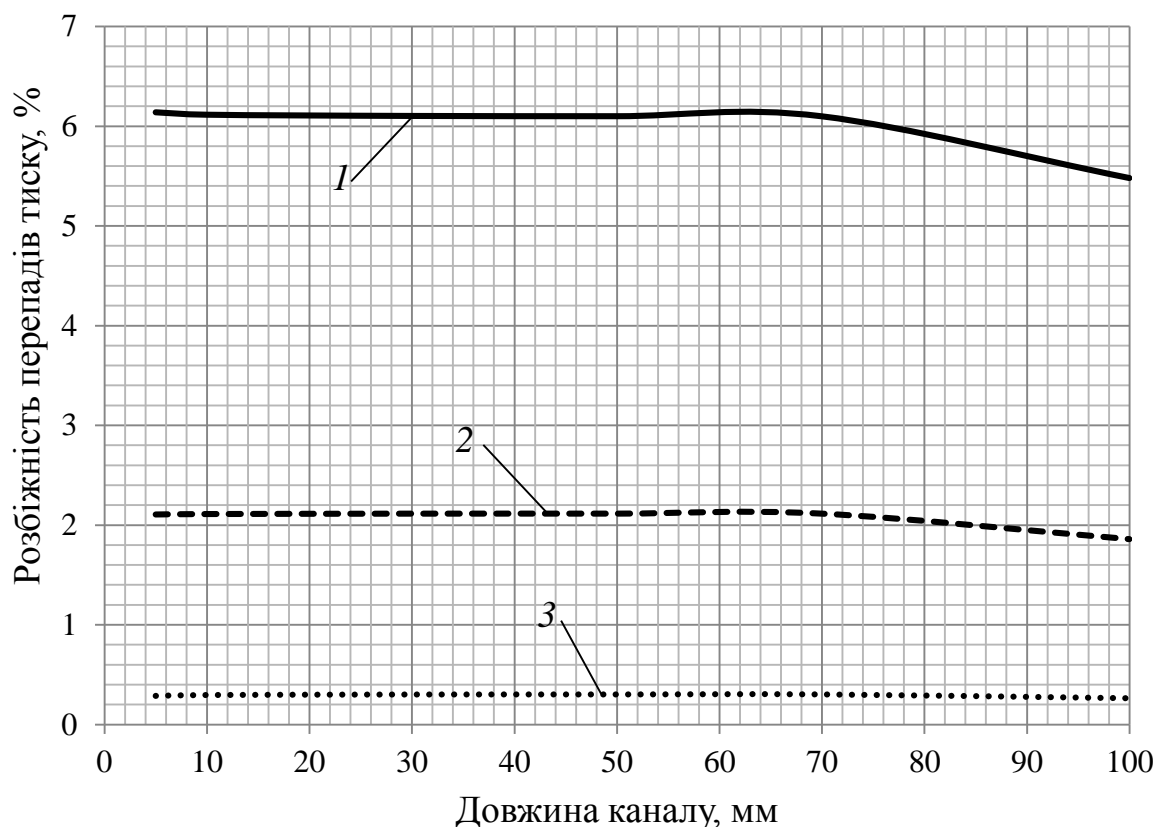
1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.24 – Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу

Як видно з рис. 3.24 залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу має несуттєвий вплив на розбіжність перепадів тиску.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків при течії без змащування та зі змащуванням було проведено

ряд досліджень при різних довжинах каналу в діапазоні від 5 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу (рис. 3.25).



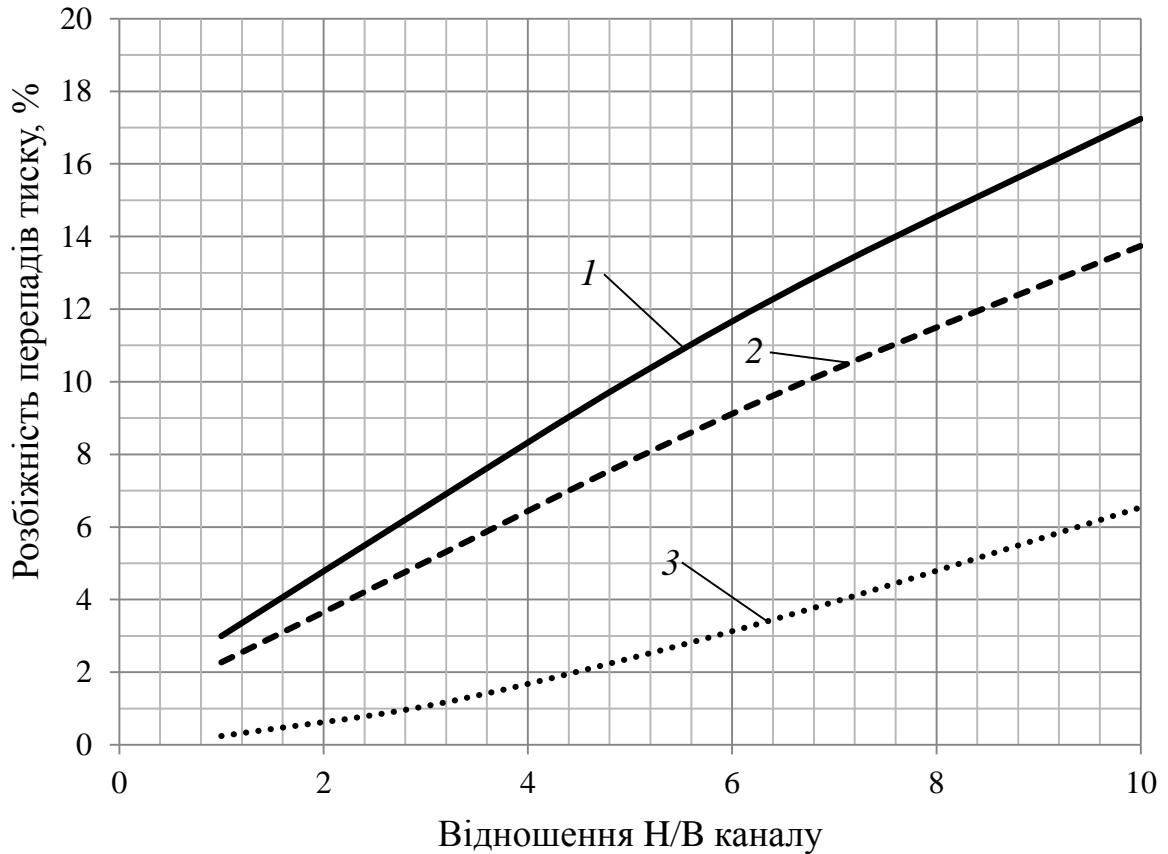
1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.25 – Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу

Як видно з рис. 3.25 залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу має несуттєвий вплив на розбіжність перепадів тиску.

Для визначення величини впливу відношення ширини до висоти каналу (H/B) каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням було проведено ряд досліджень при різних відношеннях H/B каналу в діапазоні від 1 до 10, що дозволило побудувати криві

залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення H/B каналу (рис. 3.26).

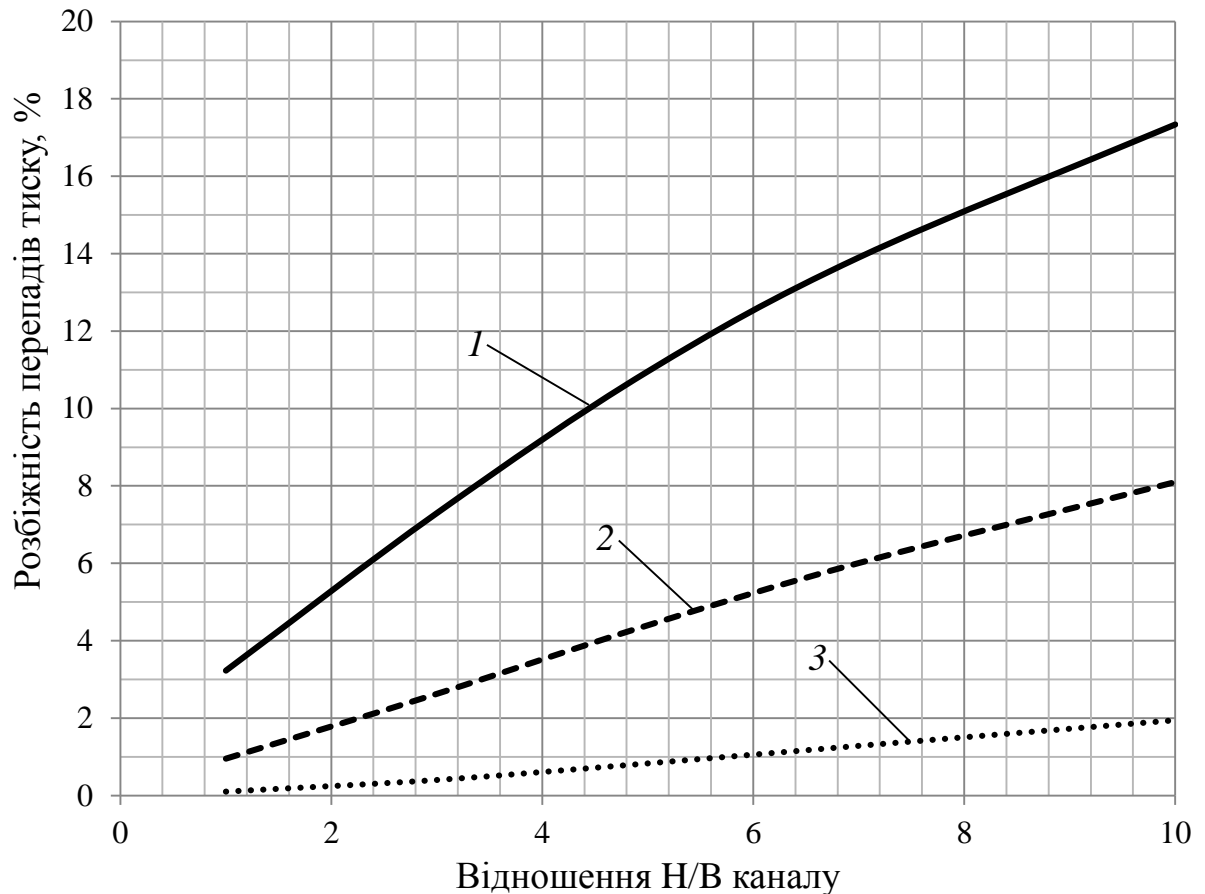


1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.26 – Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення H/B каналу

Як видно з рис. 3.26 залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення H/B каналу має вигляд степеневого закону.

Для визначення величини впливу відношення H/B каналу на розбіжність у перепадах тисків при течії без змащування та зі змащуванням було проведено ряд досліджень при різних відношеннях H/B каналу в діапазоні від 1 до 10, що дозволило побудувати криві залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення H/B каналу (рис. 3.27).



1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Рисунок 3.27 – Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення H/V каналу

Як видно з рис. 3.27 залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення H/V каналу мають вигляд степеневих закону.

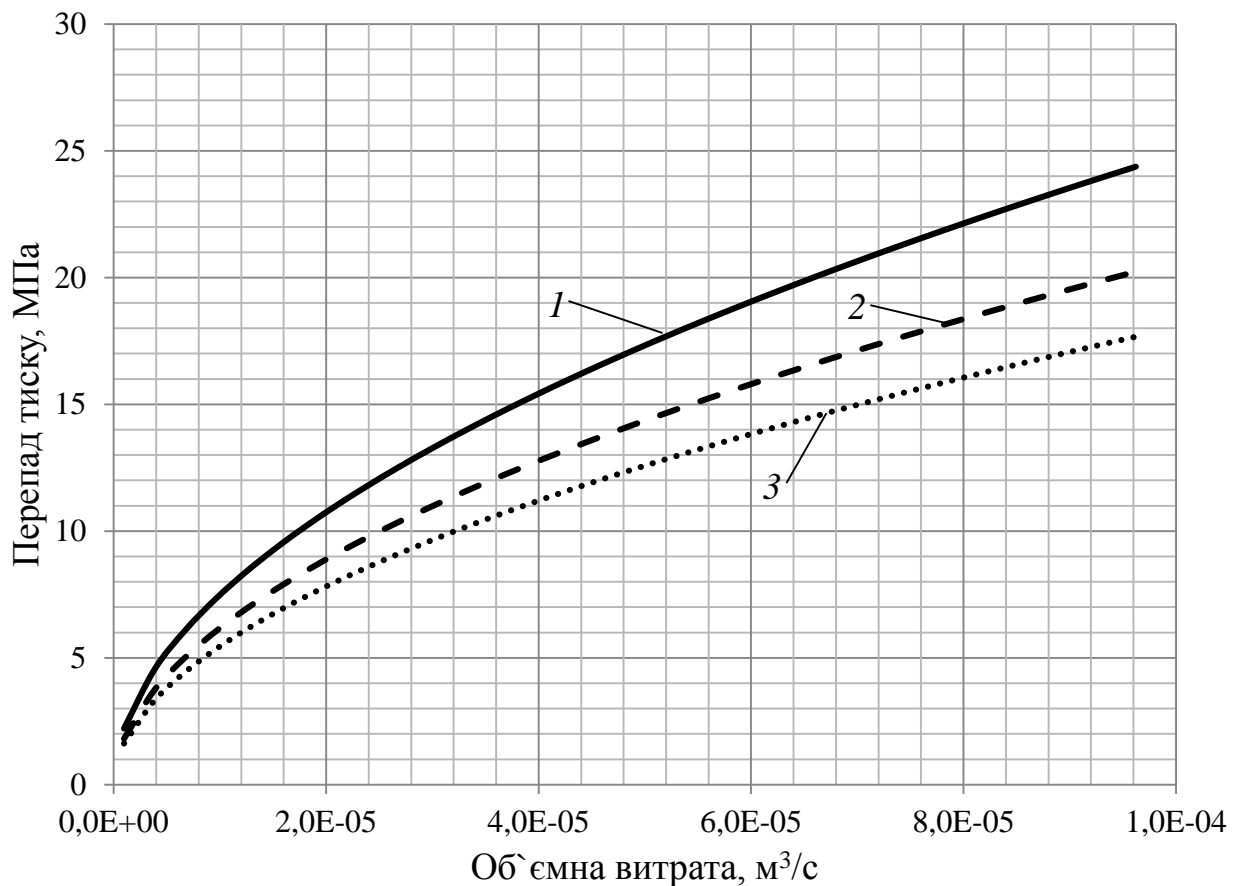
Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів суттєвий у всьому діапазоні відношень H/V .

3.3.3 Результати моделювання для каналу з геометрією формуючої головки

З метою оцінки величини впливу пристінних ефектів на параметри течії полімерного матеріалу через формуючу головку переробного обладнання було

здійснено моделювання течії розплаву полімерного матеріалу через геометрію формуючої головки.

На рис. 3.28 зображена залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для ПЕВТ 15803-020.

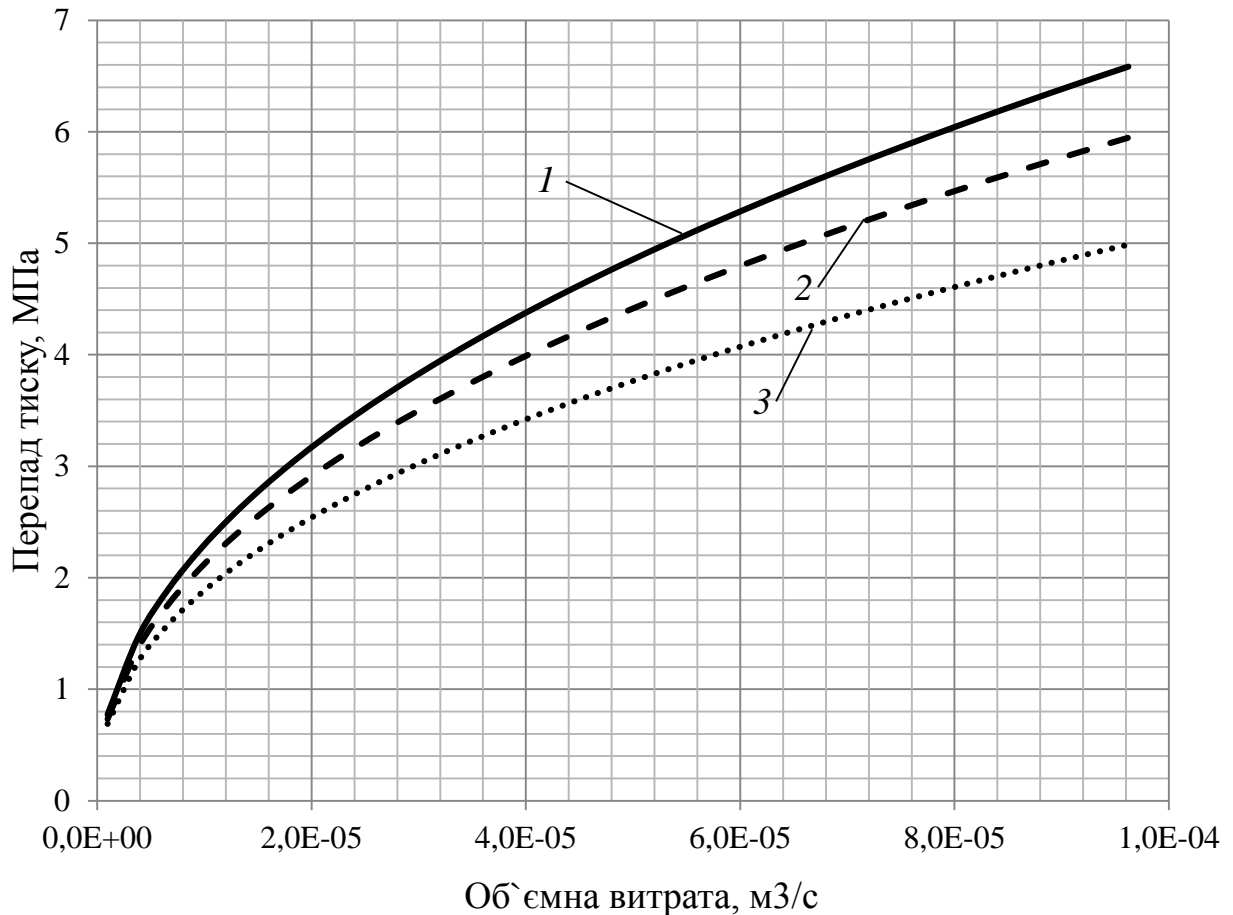


1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Рисунок 3.28 – Залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для ПЕВТ 15803-020

Як видно з рис. 3.28 відсутність врахування пристінних ефектів при числовому моделюванні течії ПЕВТ 15803-020 через геометрію формуючої головки переробного обладнання призводить до значної похибки у результатах, яка може сягати 22 %.

На рис. 3.29 зображена залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для Полістиролу ПС-С-1-3.

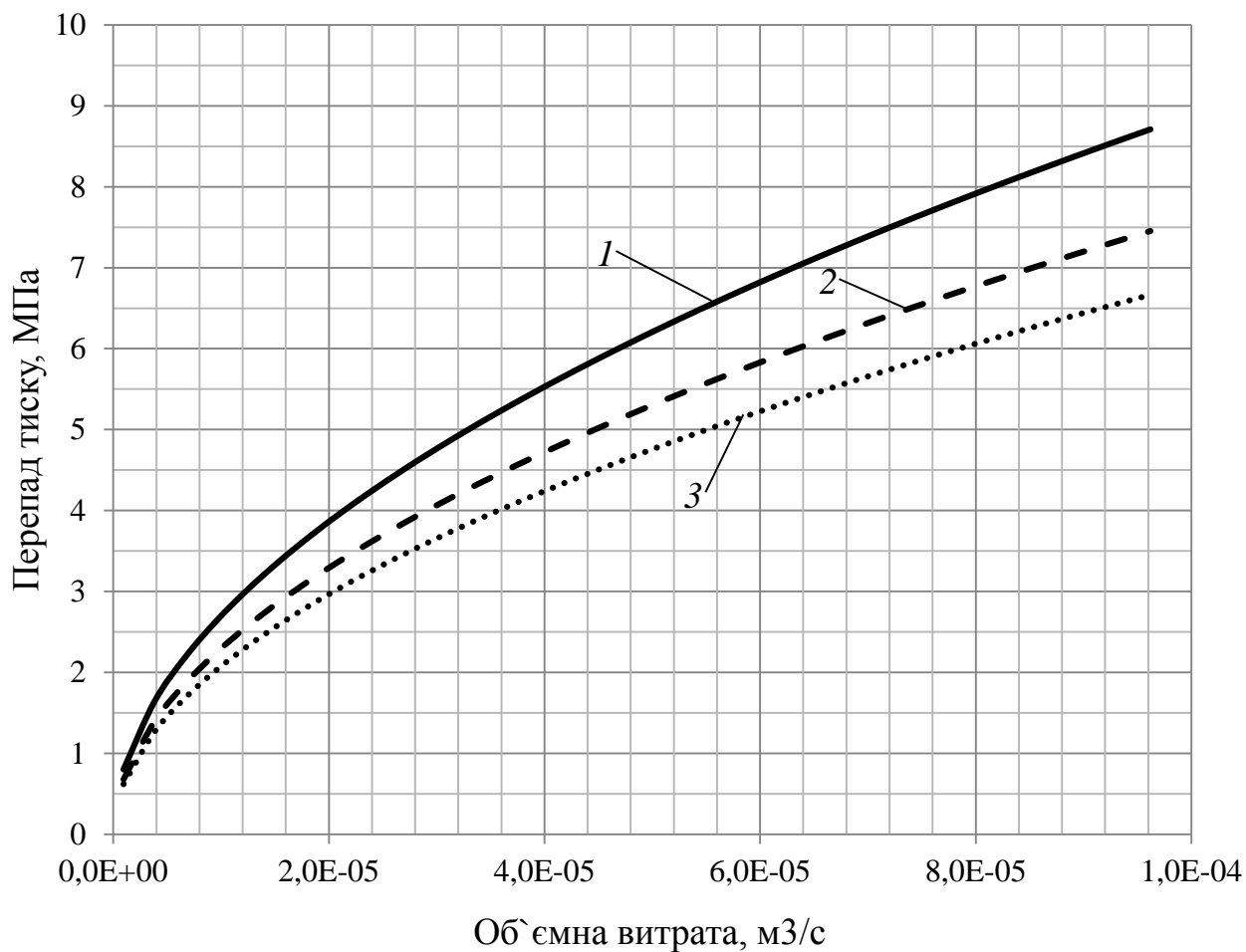


1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Рисунок 3.29 – Залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для ПС-С-1-3

Як видно з рис. 3.29 відсутність врахування пристінних ефектів при числовому моделюванні течії ПС-С-1-3 через геометрію формуючої головки переробного обладнання призводить до значної похибки у результатах, яка може сягати 11 %.

На рис. 3.30 зображена залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для Севілену 11104-030.



1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Рисунок 3.30 – Залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для
Севілену 11104-030

Як видно з рис. 3.30 відсутність врахування пристінних ефектів при числовому моделюванні течії Севілену 11104-030 через геометрію формуючої головки переробного обладнання призводить до значної похибки у результатах, яка може сягати 17 %.

3.4 Регресивні математичні моделі

У практичній діяльності часто потрібно оцінити параметри деякої системи, тобто побудувати її математичну модель і знайти числові значення параметрів цієї моделі. В якості вихідних даних для побудови моделі служать

результати експерименту, який являє собою сукупність декількох вимірювань, виконаних за певним планом.

Повний факторний експеримент [110, 111] – сукупність кількох вимірів, що задовольняють таким умовам:

- кількість вимірювань становить n^k , де n – кількість рівнів, k – кількість факторів;
- кожен фактор приймає не менше двох значень;
- у процесі вимірювання всі значення факторів комбінуються у всіх можливих поєднаннях.

Перевагами повного факторного експерименту є:

- простота рішення системи рівнянь оцінювання параметрів;
- статистична надмірність кількості вимірювань, яка зменшує вплив похибок окремих вимірювань на оцінку параметрів.

3.4.1 Регресивна модель пристінних ефектів у конічному каналі

Для виявлення ступенів впливу геометричних параметрів конічного каналу на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів необхідно провести повний факторний експеримент, що дозволить отримати регресивну математичну модель пристінних ефектів для кожного з досліджуваних матеріалів.

Фактори, які впливають на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів та вплив яких буде досліджуватися:

1. Довжина каналу.
2. Діаметр входу каналу.
3. Співвідношення діаметру входу до діаметру виходу з каналу.

В зв'язку з тим, що раніше визначені у п. 3.3 залежності впливу окремих геометричних параметрів на величину пристінних ефектів мають нелінійний

характер, необхідно проводити експеримент для кожного з параметрів по трьом рівням.

Кількість дослідів, необхідна для реалізації всіх можливих поєднань рівнів факторів:

$$N = 3^k = 3^3 = 27 \text{ дослідів,}$$

де k – кількість факторів, що впливають на процес.

Розглянемо конічну геометрію. Визначимо граничні значення для кожного з факторів, вплив яких буде досліджуватись.

1. Довжина каналу – $L = 10\text{-}50$ мм.
2. Діаметр на вході у канал – $D_{\text{вх}} = 0,5\text{-}10$ мм.
3. Співвідношення діаметру входу до діаметру виходу з каналу – $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}} = 1\text{-}5$.

Вихідним фактором, який буде характеризувати вплив пристінних ефектів на процес течії розплаву полімерного матеріалу буде розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням.

Матриця дослідів, необхідних для складення моделі, приведена у табл. Б.1.

Щоб полегшити вирішення системи, проведемо нормування факторів. Верхнім значенням факторів привласнимо нормоване значення «+1», нижнім значенням – нормоване значення «-1», середнім значенням «0» та проведемо всі необхідні дослідів, результати нормування та вихідного параметру наведені у табл. Б.2.

Вирішення системи здійснювалося за допомогою програмного комплексу регресивного аналізу ReliaSoft DOE+. Коефіцієнт детермінації регресивних моделей знаходився в межах 0,95.

Взявши абсолютні значення коефіцієнтів регресії при вхідних параметрах у нормованих координатах можна отримати внесок кожного з факторів у вихідне значення розбіжності у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти регресії у нормованих координатах

Матеріал	Діаметр каналу	Довжина каналу	Відношення $D_{вх}/D_{вих}$
ПЕВТ 15803-020	66,86 %	8,66 %	24,49 %
ПС-С-1-3	62,62 %	4,27 %	33,11 %
Севілен 11104-030	68,57 %	7,64 %	23,79 %

Як видно з табл. 3.1 максимальний вплив на процес чинить діаметр каналу, а мінімальний – довжина каналу.

В результаті регресивного аналізу отримаємо значення коефіцієнтів регресії моделі у нормованих координатах (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти регресії у нормованих координатах

Параметр	Коефіцієнти регресії		
	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
$D_{вх}$	–15,6582	–14,0626	–18,8729
L	1,7443	1,821	1,2859
$D_{вх}/D_{вих}$	5,4332	5,1508	9,9788
$D_{вх} \cdot L$	–2,1939	–2,3708	–1,4587
$D_{вх} \cdot D_{вх}/D_{вих}$	–5,9874	–6,034	–9,0766
$L \cdot D_{вх}/D_{вих}$	0,0146	–0,0083	0,0746
$D_{вх} \cdot L \cdot D_{вх}/D_{вих}$	0,4018	0,3774	0,4949

Як видно з результатів аналізу, коефіцієнти регресії, наведені у табл. 3.2, для комбінації ефектів факторів $L \cdot D_{вх}/D_{вих}$ та $D_{вх} \cdot L \cdot D_{вх}/D_{вих}$ мають надто малий вплив (менше 5 %) на систему для всіх досліджуваних матеріалів. В зв'язку з цим, для оптимізації та скорочення моделі, проводився додатковий аналіз без врахування цих коефіцієнтів.

Результатом регресивного аналізу для каналу конічної геометрії стало отримання регресивних математичних моделей для врахування впливу

пристінних ефектів на розбіжність величини перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020

$$\Delta P_{\text{розр}} = 2,83 - 306,4D_{\text{вх}} + 222,07L + 5,91\frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} - 24955D_{\text{вх}}L - 635,16\frac{D_{\text{хв}}^2}{D_{\text{вих}}},$$

для полістиролу ПС-С-1-3

$$\Delta P_{\text{розр}} = 2,75 - 646,3D_{\text{вх}} + 144,91L + 10,01\frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} - 15354D_{\text{вх}}L - 955,43\frac{D_{\text{хв}}^2}{D_{\text{вих}}},$$

для севілену 11104-030

$$\Delta P_{\text{розр}} = 6,44 - 712,88D_{\text{вх}} + 208,46L + 6,03\frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} - 23094D_{\text{вх}}L - 630,26\frac{D_{\text{хв}}^2}{D_{\text{вих}}}.$$

Отримані регресивні математичні моделі дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску у каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання.

3.4.2 Регресивна модель пристінних ефектів у прямокутному каналі

Для виявлення ступенів впливу геометричних параметрів прямокутного каналу на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів необхідно провести повний факторний експеримент, що дозволить отримати регресивну математичну модель пристінних ефектів для кожного з досліджуваних матеріалів.

Фактори, які впливають на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів та вплив яких буде досліджуватися:

1. Довжина каналу.
2. Ширина та висота каналу.
3. Співвідношення ширини до висоти каналу.

В зв'язку з тим, що раніше визначені у п. 3.3 залежності впливу окремих геометричних параметрів на величину пристінних ефектів мають нелінійний характер, необхідно проводити експеримент для кожного з параметрів по трьом рівням.

Кількість дослідів, необхідна для реалізації всіх можливих поєднань рівнів факторів:

$$N = 3^k = 3^3 = 27 \text{ дослідів,}$$

де k – кількість факторів, що впливають на процес.

Розглянемо прямокутну геометрію. Визначимо граничні значення для кожного з факторів, вплив яких буде досліджуватись.

1. Довжина каналу – $L = 10\text{--}50$ мм.
2. Ширина каналу – $H = 0,5\text{--}10$ мм.
3. Співвідношення ширини до висоти каналу – $H/B = 1\text{--}5$.

Вихідним фактором, який буде характеризувати вплив пристінних ефектів на процес течії розплаву полімерного матеріалу буде розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням.

Матриця дослідів, необхідних для складення моделі, приведена у табл. Б.3.

Щоб полегшити вирішення системи, проведемо нормування факторів. Верхнім значенням факторів привласнимо нормоване значення «+1», нижнім значенням – нормоване значення «-1», середнім значенням «0» та проведемо всі необхідні дослідів, результати нормування та вихідного параметру наведені у табл. Б.4.

Вирішення системи здійснювалося за допомогою програмного комплексу регресивного аналізу ReliaSoft DOE+.

Взявши абсолютні значення коефіцієнтів регресії при вхідних параметрах у нормованих координатах можна отримати внесок кожного з факторів у вихідне значення розбіжності у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти регресії у нормованих координатах

Матеріал	Ширина каналу	Довжина каналу	Відношення H/B
ПЕВТ 15803-020	63,81 %	8,73 %	27,45 %
ПС-С-1-3	60,68 %	11,61 %	27,71 %
Севілен 11104-030	64,29 %	8,32 %	27,39 %

Як видно з табл. 3.3 максимальний вплив на процес чинить ширина каналу, а мінімальний – довжина каналу.

В результаті регресивного аналізу отримаємо значення коефіцієнтів регресії моделі у нормованих координатах (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти регресії у нормованих координатах

Параметр	Коефіцієнти регресії		
	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
H	–11,0121	–9,2670	–6,8492
L	–1,4252	–1,2679	–1,3107
H/B	4,6915	3,9869	3,1279
$H \cdot L$	2,2147	1,9457	2,0054
$H \cdot H/B$	–3,9394	–3,6125	–4,1130
$L \cdot H/B$	–0,5962	–0,5770	–0,7795
$H \cdot L \cdot H/B$	0,8541	0,8664	1,1855

Як видно з результатів аналізу, коефіцієнти регресії, наведені у табл. 3.4, для комбінації ефектів факторів $L \cdot H/B$ та $H \cdot L \cdot H/B$ мають надто малий вплив (менше 5 %) на систему для всіх досліджуваних матеріалів. В зв'язку з цим, для оптимізації та скорочення моделі, проводився додатковий аналіз без врахування цих коефіцієнтів.

Результатом регресивного аналізу для каналу конічної геометрії стало отримання регресивних математичних моделей для врахування впливу

пристінних ефектів на розбіжність величини перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020

$$\Delta P_{розр} = 12,37 - 1424,58H - 170,92L + 3,99\frac{H}{B} + 20481HL - 380,26\frac{H^2}{B},$$

для полістиролу ПС-С-1-3

$$\Delta P_{розр} = 6,35 - 776,37H - 176,36L + 3,84\frac{H}{B} + 21109HL - 432,94\frac{H^2}{B},$$

для севілену 11104-030

$$\Delta P_{розр} = 15,4 - 1773,67H - 193,65L + 4,52\frac{H}{B} + 23312HL - 414,67\frac{H^2}{B}.$$

Отримані регресивні математичні моделі дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску у каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання.

3.5 Висновки

Було доповнено існуючу математичну модель течії полімерних матеріалів врахуванням пристінних ефектів та створено методики визначення параметрів матеріалів в залежності від природи виникнення пристінних ефектів.

Для перевірки адекватності математичної моделі та отриманих параметрів матеріалу було здійснено порівняння залежностей перепаду тиску від витрати, отриманих експериментально та моделюванням з урахуванням пристінних ефектів, а також порівняння з існуючими результатами. Дані, отримані при моделюванні відрізняються від експериментальних не більше ніж на 5 %, а у порівнянні з існуючими результатами не більше ніж на 20 %, що пояснюється різним підходом до визначення параметрів матеріалу, граничних умов та відмінностей у математичних моделях. Прийнятне співпадіння з

експериментальними даними та існуючими результатами свідчить про адекватність моделі.

За результатами числового моделювання процесу течії полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів отримано залежності величин впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії для циліндричного та прямокутного каналів.

Для оцінки величини впливу пристінних ефектів при числовому моделюванні на геометрії формуючої головки було здійснено додаткове моделювання, яке продемонструвало, що нехтування пристінними ефектами при числовому моделюванні призводить до похибки у отриманих значеннях від 11 % до 22 % в залежності від матеріалу.

Числове моделювання дозволило створити регресивні математичні моделі для врахування впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії, які дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску у каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання.

За результатами моделювання опубліковано статті [112-117] та зроблено доповіді на науково-практичних конференціях [118-125].

4 ВПРОВАДЖЕННЯ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

В процесі виконання досліджень за темою дисертаційної роботи було розроблено нові конструкції екструзійних головок, черв'яка екструдера, а також на базі здійсненого числового моделювання проведено уточнення моделей переробного обладнання ПАТ «НВП «Більшовик». Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних, лабораторних та індивідуальних занять, виконання курсових проектів і робіт з дисциплін «Полімерне обладнання», «Реологія», а також під час виконання дипломного проектування на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ «КПІ». (Акти впровадження результатів додаються, додаток В).

4.1 Головка екструзійна

Розроблена [126] конструкція екструзійної головки (рис. 4.1) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій розплаву, що призводить до зменшення кількості виробів з дефектами поверхні. Це вирішується шляхом встановлення демпфуючого та пружного елементів з можливістю поглинання пульсацій розплаву та зміни площі поперечного перерізу каналу, по якому рухається розплав.

Кільцева екструзійна головка (рис. 4.1) містить матрицю 1, що формує зовнішню поверхню полімерного виробу, та дорн 2, що формує внутрішню поверхню виробу. Дорн 2 і матриця 1 закріплені в дорнотримачі 3, утворюючи канал 4 для протікання розплаву з вихідною ділянкою 5, причому матриця може рухатись зворотно-поступально вздовж осі, змінюючи переріз каналу 4. На матриці 1 встановлено пружний 6 і демпфуючий 7 елементи, що передають зусилля від неї на кришку 8.

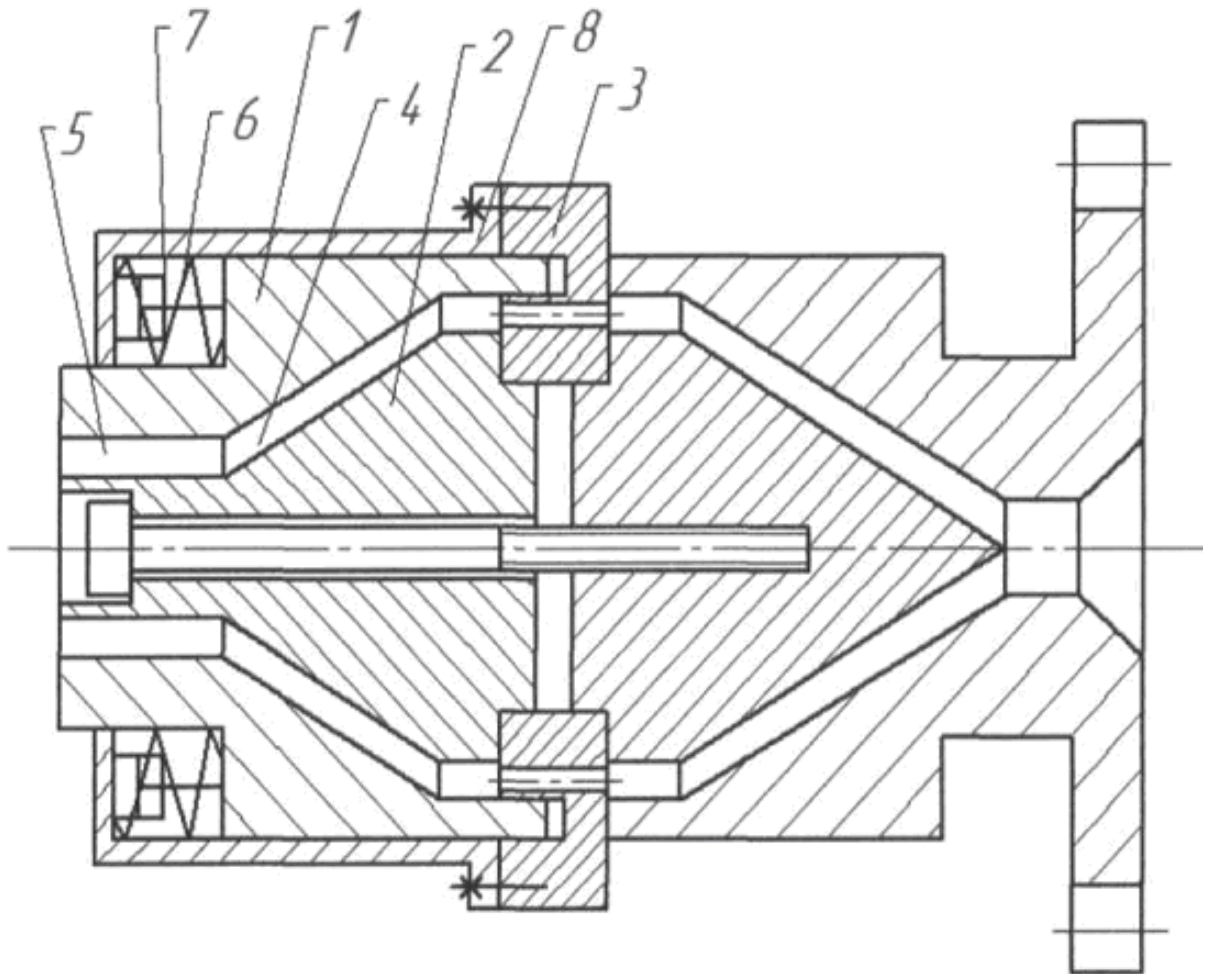


Рисунок 4.1 – Конструкція екструзійної головки

Розплав, що входить у головку, потрапляє в канал 4 між внутрішньою поверхнею матриці 1 та зовнішньою поверхнею дорна 2, утворюючи перепад тиску, що призводить до утворення сили, яка переміщує матрицю 1 в осьовому напрямку. При цьому поперечний переріз каналу 4 збільшується, а тиск в ньому починає зменшуватись. Матриця 1, переміщуючись в осьовому напрямку, передає зусилля на кришку 8 через демпфер 7, який зменшує швидкість переміщення, і пружину 6, яка намагається відвести матрицю в початкове положення. Так як процес відбувається безперервно, то матриця виконує зворотно-поступальні рухи, тим самим поглинаючи пульсації.

4.2 Головка екструзійна

Розроблена [127] конструкція екструзійної головки (рис. 4.2) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій розплаву, що призводить до зменшення кількості виробів з дефектами поверхні. Це вирішується шляхом виконання дорнотримача з двох частин з можливістю зворотно-поступального руху однієї частини відносно іншої, матриця і вихідна частина дорну закріплені на рухомій частині дорнотримача таким чином, що довжина каналу має можливість змінюватись.

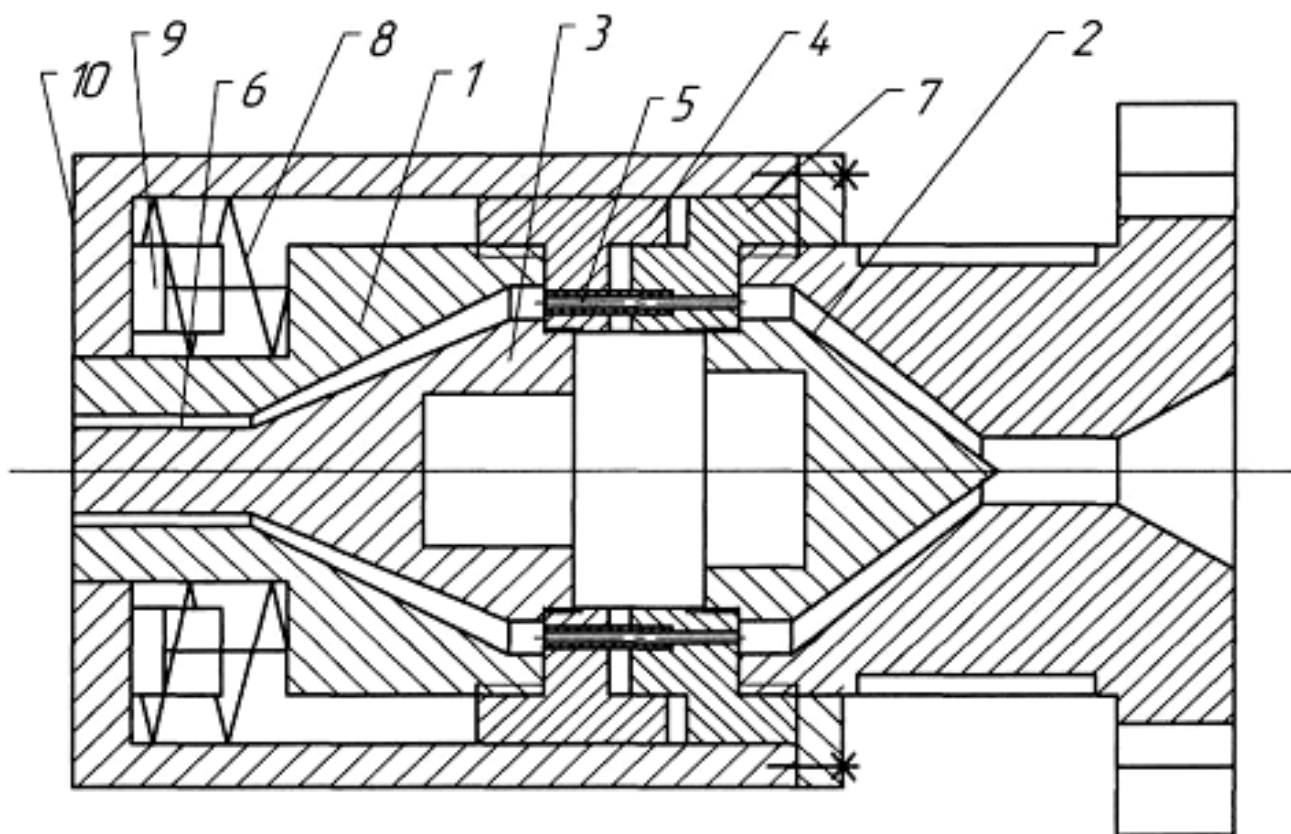


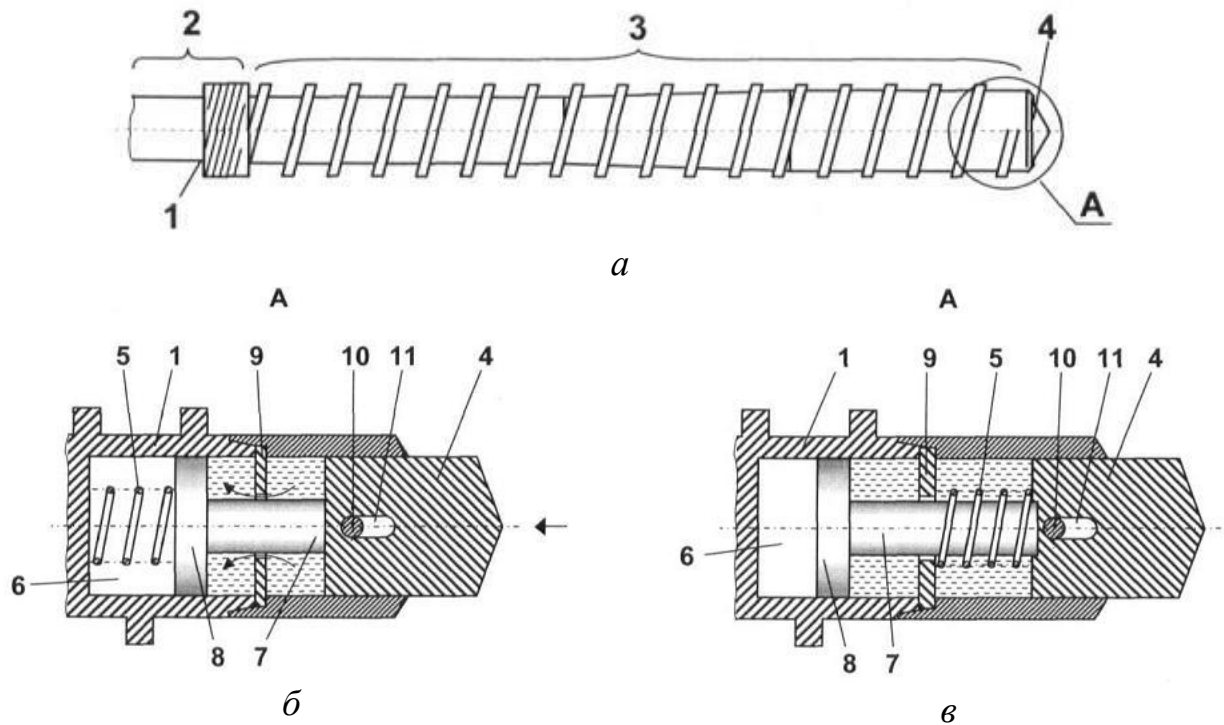
Рисунок 4.2 – Конструкція екструзійної головки

Кільцева екструзійна головка (рис. 4.2) містить матрицю 1, що формує зовнішню поверхню полімерного виробу, та дорн, що формує внутрішню поверхню виробу і який складається з вхідної частини 2 та вихідної частини 3.

Вихідна частина дорну 3 і матриця 1 закріплені в рухомій частині дорнотримача 4, утворюючи канал 5 для протікання розплаву з вихідною ділянкою 6, причому матриця 1 і вихідна частина дорну 3 можуть рухатись зворотно-поступально вздовж осі, відносно нерухомої частини дорнотримача 7, змінюючи довжину каналу 5. На матриці 1 встановлено пружний 8 і демпфуючий 9 елементи, що передають зусилля від неї на кришку 10. Корисна модель працює таким чином. Розплав, що входить у головку, потрапляє в канали 5 та 6, при цьому між вихідною частиною дорна 3 та вхідною частиною 2, утворюючи перепад тиску, що призводить до утворення осьової сили, яка переміщує матрицю 1 з вихідною частиною дорна 3 і рухомою частиною дорнотримача 4 відносно нерухомої частини дорнотримача 7. При цьому довжина каналу 5 збільшується, а тиск в головці починає зменшуватись. Матриця 1, переміщуючись в осьовому напрямку, передає зусилля на кришку 10 через демпфер 9, який зменшує швидкість переміщення, і пружину 8, яка намагається відвести матрицю в початкове положення. Так як процес відбувається безперервно, то матриця з вихідною частиною дорна виконує зворотно-поступальні рухи, тим самим поглинаючи пульсації.

4.3 Черв'як екструдера

Розроблена [128] конструкція черв'яка екструдера (рис. 4.3) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій тиску, що призводить до поліпшення умов роботи черв'ячних екструдерів. Це вирішується шляхом спорядження наконечника з боку хвостовика вала штоком з розташованим на його кінці поршнем, при цьому ділянка осьового отвору вала між наконечником і поршнем заповнена в'язкою рідиною, а в осьовому отворі вала на зазначеній ділянці закріплено нерухому дросельну шайбу.



а – загальний вигляд черв'яка; *б* – приклад розташування пружного елемента між поршнем та дном осьового отвору вала; *в* – приклад розташування пружного елемента між наконечником і дросельною шайбою

Рисунок 4.3 – Конструкція екструзійної головки

Черв'як екструдера містить вал *1* з послідовно розташованими хвостовиком *2*, робочою зоною *3* з гвинтовою нарізкою, а також наконечником *4*, спорядженим пружним елементом *5* (наприклад, пружиною стиснення) і встановленим з можливістю зворотно-поступального руху в осьовому отворі *б* вала *1*. Наконечник *4* з боку хвостовика вала *2* споряджено штоком *7* з розташованим на його кінці поршнем *8*, при цьому ділянка осьового отвору *б* вала *1* між наконечником *4* і поршнем *8* заповнено в'язкою рідиною, а в осьовому отворі *б* вала *1* на зазначеній ділянці закріплено нерухому дросельну шайбу *9*. Штифт *10*, що проходить крізь овальний отвір *11* наконечника *4*, фіксує його від провертання відносно робочої зони *3* черв'яка (рис. 4.3, *а*). Пружний елемент *5* при цьому може бути встановлено або між поршнем *8* і дном осьового отвору *б* вала *1* (рис. 4.3, *б*), або між наконечником *4* і дросельною шайбою *9* (рис. 4.3, *в*). Черв'як працює в такий спосіб. Сировина,

що підлягає переробленню, послідовно просувається нарізкою робочої частини 3 від хвостовика 2 до наконечника 5, поступово ущільнюється, нагрівається і плавиться. Під час раптового небажаного підвищення тиску з боку екструзійної головки відбувається переміщення наконечника 4 у бік хвостовика 2 черв'яка, а отже скорочення загальної довжини черв'яка та збільшення об'єму робочого каналу екструдера з боку наконечника 4, що сприяє зниженню тиску. Також під час руху наконечника 2 в осьовому отворі 6 вала 1 відбувається поступове перетікання в'язкої рідини з об'єму перед дросельною шайбою 9 в об'єм за неї (тобто здійснюється достатньо повільний рух наконечника 4). Після певного зниження тиску наконечник 4 повністю або частково повертається у вихідне положення, після чого тиск у робочому каналі екструдера стабілізується. При цьому незалежно від пропускної здатності дросельної шайби 9 та жорсткості пружного елемента 5 забезпечується ефективно "гасіння" коливань тиску на вході в екструзійну головку екструдера.

4.4 Впровадження результатів науково-технічних розробок

Було розроблено та передано до використання на ПАТ «НВП «Більшовик» науково-технічний продукт у вигляді методики автоматизованого проектування та 3D-моделей обладнання для виготовлення полімерних та гумотехнічних виробів, в якому застосовано сучасний підхід до проектування та моделювання з урахуванням пристінних ефектів.

Створені тривимірні моделі конструкцій та вузлів дозволяють більш точно обґрунтувати вибір їх геометричних і конструктивних параметрів та уникнути багатьох помилок, характерних при використанні традиційного підходу.

Було встановлено, що використання запропонованої методики автоматизованого проектування і конструктивних пропозицій дозволяє вдосконалити технологічні параметри процесів та конструкції робочих органів,

за яких забезпечується підвищена продуктивність та якість виробів за умов зниження енергоємності процесів їх виробництва.

Очікуваний економічний ефект від впровадження технічних пропозицій з удосконалення конструктивного оформлення обладнання для виготовлення полімерних та гумотехнічних виробів при його виробництві ПАТ «НВП «Більшовик» складає 362 тисячі грн. на рік.

4.5 Висновки

Розроблено конструкції екструзійних головок, що дозволяють компенсувати вплив пульсацій розплаву, які виникають внаслідок дії пристінних ефектів.

На розроблені конструкції отримано патенти України на корисну модель [126-128] та зроблено доповідь на науково-практичній конференції [129].

Результати дисертаційної роботи впроваджено ПАТ «НВП «Більшовик» (м. Київ) при проектуванні та виготовленні переробного обладнання.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що існуючі моделі та методики врахування пристінних ефектів при течії полімерних матеріалів мають не універсальний характер, не в повній мірі враховують природу виникнення пристінних ефектів, працюють не у всьому діапазоні геометричних параметрів каналів переробного обладнання та мають обмеження щодо їх застосування при числовому моделюванні.

2. Розроблено методику визначення наявності пристінних ефектів у полімерному матеріалі та природи цих ефектів. В залежності від природи пристінних ефектів розроблено методики визначення величини цих ефектів у матеріалі.

3. Проведено експериментальні дослідження, що дозволили отримати дані про природу, характер, величину пристінних ефектів та параметри для завдання граничних умов при числовому моделюванні для досліджуваних полімерних матеріалів. Обчислена сумарна відносна похибка експериментальних досліджень становить 3,1 % при довірчому інтервалі 95 %.

4. Математичну модель течії полімерних матеріалів доповнено врахуванням пристінних ефектів в залежності від їх природи та матеріалу, що дозволило створити універсальний підхід до визначення параметрів процесу течії під час числового моделювання.

5. Проведено числові дослідження впливу геометричних параметрів каналу на розбіжності перепаду тиску між умовами відсутності швидкості на стінці та врахування пристінних ефектів. Дослідження показали, що при числовому моделюванні течії полімерного матеріалу по геометрії формуючої головки нехтування пристінними ефектами призводить до похибки у отриманих результатах від 11 % до 22 % в залежності від матеріалу.

6. Встановлено, що пристінні ефекти під час моделювання течії полімерного матеріалу при проектуванні переробного обладнання недоцільно

враховувати при довжині каналу менше 20 мм та гідравлічних діаметрах каналів більше 8 мм внаслідок величини їх впливу на процес менше 1 %.

7. Створено регресивні математичні моделі для врахування впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії, які дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску у каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання.

8. Розроблено конструкцію екструзійної головки, що дозволяє компенсувати вплив пульсацій розплаву, які виникають внаслідок дії пристінних ефектів, за рахунок встановлення демпфуючого та пружного елементів з можливістю поглинання пульсацій розплаву та зміни площі поперечного перерізу каналу. На розроблену конструкцію отримано патент України на корисну модель.

9. Розроблено конструкцію екструзійної головки, що дозволяє компенсувати вплив пульсацій розплаву, які виникають внаслідок дії пристінних ефектів, за рахунок виконання дорнотримача з двох частин з можливістю зворотно-поступального руху однієї частини відносно іншої, та закріплення матриці і вихідної частини дорну на рухомій частині дорнотримача таким чином, що довжина каналу має можливість змінюватись. На розроблену конструкцію отримано патент України на корисну модель.

10. Розроблено конструкцію черв'яка екструдера, що дозволяє забезпечити поглинання пульсацій тиску, які виникають внаслідок дії пристінних ефектів, за рахунок спорядження наконечника з боку хвостовика вала штоком з розташованим на його кінці поршнем, при цьому ділянка осьового отвору вала між наконечником і поршнем заповнена в'язкою рідиною, а в осьовому отворі вала на зазначеній ділянці закріплено нерухому дросельну шайбу. На розроблену конструкцію отримано патент України на корисну модель.

11. Результати дисертаційної роботи впроваджено на ПАТ «НВП «Більшовик» (м. Київ) при проектуванні та виготовленні переробного обладнання та у навчальний процес кафедри ХПСМ НТУУ «КПІ».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутко А. Е. Украинский рынок утилизации полимерных отходов и ключевые тенденции его развития / А. Е. Бутко. // Young Scientist. — 2015. — № 2. — С. 139—142.
2. Пахаренко В. А. Переработка полимерных композиционных материалов : учеб. пособие [для вузов] / В. А. Пахаренко, Р. А. Яковлева, А. В. Пахаренко. — К. : Воля, 2006. — 552 с.
3. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / О. В. Суберляк, П. І. Баштанник. — Львів : Растр-7, 2007. — 376 с.
4. Основы технологии переработки пластмасс : учебник для вузов / [С. В. Власов, Э. Л. Калинин, Л. Б. Кандырин и др.] ; под ред. В. Н. Кулезнёва и В. К. Гусева. — М. : Химия, 2004. — 596 с.
5. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. — М. : Химия, 1977. — 464 с.
6. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ. под ред. Р. В. Торнера. — М. : Химия, 1984. — 632 с.
7. Техника переработки пластмасс / под ред. Н. И. Басова и В. М. Броя. — М. : Химия, 1985. — 528 с.
8. Басов Н. И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов : учеб. для вузов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович. — М. : Химия, 1986. — 488 с.
9. Торнер Р. В. Оборудование заводов по переработке пластмасс : учеб. пособие [для студентов вузов] / Р. В. Торнер, М. С. Акутин. — М. : Химия, 1986. — 400 с.
10. Раувендааль К. Экструзия полимеров / К. Раувендааль ; пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. — СПб. : Профессия, 2006. — 768 с.

11. Володин В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. — СПб. : Профессия, 2005. — 480 с.
12. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. слов. / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2005. — 179 с.
13. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії / Л. Б. Радченко. — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.
14. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. — М. : Химия, Колос, 2005. — 568 с. — (Учебники и учебные пособия для студ. высш. уч. зав.).
15. Жданов Ю. А. Исследование течения расплавов полимеров в каналах головок червячных машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. / Ю. А. Жданов — К., 1969. — 24 с.
16. Пристінні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. С. Сахаров, О. Л. Сокольський, Д. Д. Рябінін. — Київ: НТУУ КПІ, 2009. — 140 с.
17. Stokes Y. M. On generalized penalty approaches for slip, free surface and related boundary conditions in viscous flow simulation / Y. M. Stokes, G. F. Carey. // International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. — 2010. — N 21. — P. 668—702.
18. Potente H. Description of the pressure through input behavior of a single-screw plasticating unit in consideration of wall slippage effects for non-newtonian material and 1-D flow / H. Potente, K. Timmermann, M. Kurte-Jardin. // International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society. — 2006. — N 21. — P. 272—281.
19. Ramamurthy A. Wall slip in viscous fluids and influence of materials of construction / A. Ramamurthy. // Journal of Rheology. — 1986. — N 30. — P. 337—350.

20. Polymer Processing, Principles and Modeling / J. Agassant, P. Avenas, J. Sergent, P. J. Carreau. — Munich: Hanser, 1991. — 204 p.
21. Dealy J. Melt Rheology and its Role in Plastics Processing: Theory and Applications / J. Dealy, K. Wissbrun. — New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. — 680 p.
22. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия (ред.) ; пер. с англ. под ред. Г. Е. Заикова. — СПб. : Профессия, 2007. — 400 с.
23. Ferrás L. L. Theoretical and Numerical Studies of Slip Flows / L. L. Ferrás. — Minho: Universidade do Minho, 2012. — 308 p.
24. Denn M. M. Extrusion instabilities and wall slip / M. M. Denn. // Fluid Mechanics. — 2001. — N 33. — P. 265—287.
25. Archer L. Wall slip: measurement and modeling issues. Polymer Processing Instabilities / L. Archer. — New York: Marcel Dekker, 2005. — 73 p.
26. Gevgilili H. Step strain flow: Wall slip effects and other error sources / H. Gevgilili, D. Kalyon. // Journal of Rheology. — 2001. — N 45. — P. 467—475.
27. Phan-Thien N. Influence of wall slip on extrudate swell: a boundary element investigation / N. Phan-Thien. // Journal of non-newtonian fluid mechanics. — 1988. — N 26. — P. 327—340.
28. Black W. B. Wall-slip and polymer-melt flow instability / W. B. Black, M. D. Graham. // Physical Review Letters. — 1996. — N 77. — P. 956—959.
29. Georgiou G. C. On the stability of the shear flow of a viscoelastic fluid with slip along the fixed wall / G. C. Georgiou. // Rheologica Acta. — 1996. — N 35. — P. 39—47.
30. Black W. B. Effect of wall slip on the stability of viscoelastic plane shear flow / W. B. Black, M. D. Graham. // Physics of Fluids. — 1999. — N 11. — P. 1749—1756.
31. Morrison F. A. Understanding Rheology / F. A. Morrison. — Oxford: Oxford University Press, 2001. — 560 p.

32. Sunarso A. Numerical analysis of wall slip effects on flow of Newtonian and Non-Newtonian fluids in macro and micro contraction Channels / A. Sunarso, T. Yamamoto, N. Mori. // *Journal of Fluids Engineering*. — 2007. — N 129. — P. 23—31.

33. Ferrás L. L. Implementation of slip boundary conditions in the finite volume method: new techniques / L. L. Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho. // *International journal for numerical methods in fluids*. — 2013. — N 72. — P. 724—747.

34. Implementation of a Slip Boundary Condition in a Finite Volume Code Aimed to Predict Fluid Flows / L. L. Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho, O. S. Carneiro. // *Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica*. — 2008. — N 8. — P. 1—10.

35. Скачков В. В. Моделирование и оптимизация экструзии полимеров / В. В. Скачков, Р. В. Торнер, Ю. В. Стунгур, С. В. Реутов — Л.: Химия, 1984. — 152 с.

36. Жданов Ю. А. Расчет и профилирование каналов формующих головок с круглым цилиндрическим коллектором / Ю. А. Жданов, П. К. Допира, Л. А. Иванова // Сб. «Химическое машиностроение», вып. 22. — К.: «Техніка». — 1975. — С. 23-31.

37. Piau J. M. Measurement and modelling of friction in polymer melts during macroscopic slip at the wall / J. M. Piau, N. E. Kissi. // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 1994. — N 54. — P. 121—142.

38. Sunarso A. Numerical simulation of polymeric flow in contraction channels: wall slip and channel size dependent effects / A. Sunarso, T. Yamamoto, N. Mori. // *FLOW DYNAMICS*. — 2006. — N 832. — P. 341—344.

39. Милдман С. Течение полимеров / С. Милдман; пер. с англ. Ю. Н. Панова ; под ред. А. Я. Малкина. — М. : Мир, 1971. — 264 с.

40. Яхно О. М. Гідравліка неньютонівських рідин : навч. посіб. / О. М. Яхно, В. І. Желяк. — К. : Вища шк., 1995. — 199 с.

41. Ferrás L. L. Analytical solutions for Newtonian and inelastic non-Newtonian flows with wall slip / L. L. Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho. // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 2012. — N 175. — P. 76—88.
42. Wall slip and shear stresses of polymer melts at high shear rates without pressure and viscous heating effects / K. Awati, Y. Park, E. Weisser, M. Mackay. // *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. — 2000. — N 89. — P. 117—131.
43. Craig V. Shear-dependent boundary slip in an aqueous newtonian liquid / V. Craig, C. Neto, D. Williams. // *Physical review letters*. — 2001. — N 87. — P. 545—564.
44. Brochard F. Shear-dependent slippage at a polymer/ solid interface / F. Brochard, P. De Gennes. // *Langmuir*. — 1992. — N 8. — P. 3033—3037.
45. Migler K. Slip transition of a polymer melt under shear stress / K. Migler, H. Hervet, L. Leger. // *Physical review letters*. — 1993. — N 70. — P. 287—290.
46. Navier C. L. Memoire sur les lois du mouvement des fluids / C. L. Navier. // *Mem. Acad. Roy. Sci. Inst. Fr.*. — 1827. — N 6. — P. 389—440.
47. Le Roux C. Steady solutions of the Navier—Stokes equations with threshold slip boundary conditions / C. Le Roux, A. Tani. // *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. — 2007. — N 30. — P. 595—624.
48. Matthews M. T. Newtonian flow with nonlinear Navier boundary condition / M. T. Matthews, J. M. Hill. // *Acta Mechanica*. — 2007. — N 191. — P. 195—217.
49. Joshi Y. Planar contraction flow with a slip boundary condition / Y. Joshi, M. Denn. // *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. — 2003. — N 114. — P. 185—195.
50. Liakos A. Discretization of the navier-stokes equations with slip boundary condition / A. Liakos. // *Numerical Methods for Partial Differential Equations*. — 2001. — N 17. — P. 26—42.
51. Verfürth R. Finite element approximation on incompressible navier-stokes equations with slip boundary condition / R. Verfürth. // *Numerische Mathematik*. — 1986. — N 50. — P. 697—721.

52. John V. Slip with friction and penetration with resistance boundary conditions for the navier-stokes equations: numerical tests and aspects of the implementation / V. John. // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 2002. — N 147. — P. 287—300.

53. Hatzikiriakos S. G. Wall Slip of Molten Polymers / S. G. Hatzikiriakos. // *Progress in Polymer Science*. — 2012. — N 37. — P. 624—643.

54. Potente H. Global concept for describing and investigation of wall slip effects in the extrusion process / H. Potente, H. Ridder, R. V. Cunha. // *Macromolecular Materials and Engineering*. — 2002. — N 11. — P. 836—842.

55. Meijer H. Modeling of extrusion with slip boundary conditions / H. Meijer, C. Verbraak. // *Polymer Engineering & Science*. — 1988. — N 28. — P. 758—772.

56. Exact solutions for flows of an Oldroyd 8-constant fluid with nonlinear slip conditions / R. Ellahi, T. Hayat, F. M. Mahomed, A. Zeeshan. // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. — 2009. — N 15. — P. 322—330.

57. Schowalter W. R. The behavior of complex fluids at solid boundaries / W. R. Schowalter. // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 1988. — N 29. — P. 25—36.

58. Hatzikiriakos S. G. A slip model for linear polymers based on adhesive failure / S. G. Hatzikiriakos. // *International Polymer Processing*. — 1993. — N 8. — P. 135—142.

59. Joshi Y. Slipping fluids: a unified transient network model / Y. Joshi, A. Lele, R. Mashelkar. // *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. — 2000. — N 89. — P. 303—335.

60. Thompson P. A. A general boundary condition for liquid flow at solid surfaces / P. A. Thompson, S. M. Troian. // *Nature*. — 1997. — N 389. — P. 360—362.

61. Goldstein S. *Modern Developments in Fluid Dynamics: An Account of Theory and Experiment Relating to Boundary Layers, Turbulent Motion and Wakes* / S. Goldstein. — New York: Dover, 1965. — 702 p.

62. ANSYS Polyflow User's Guide — Canonsburg: ANSYS, Inc., 2013. — 790 p.
63. Hatzikiriakos S. G. A dynamic slip velocity model for molten polymers based on a network kinetic theory / S. G. Hatzikiriakos, N. Kalogerakis. // *Rheologica Acta*. — 1994. — N 33. — P. 38—47.
64. Black W. B. Wall slip and boundary effects in polymer shear flows / W. B. Black. — Wisconsin: University of Wisconsin — Madison, 2000. — 125 p.
65. Yarin A. L. A model for slip at polymer/solid interfaces / A. L. Yarin, M. D. Graham. // *Journal of Rheology*. — 1998. — N 42. — P. 1491—1504.
66. Dynamics of Polymeric Liquids / R. B. Bird, C. F. Curtiss, R. C. Armstrong, O. Hassager. — New York: Wiley-Interscience, 1987. — 672 p.
67. Hatzikiriakos, Stability of the annular Poiseuille flow of a Newtonian liquid with slip along the walls / M. Chatzimina, G. Georgiou, K. Housiadas, S. G. Hatzikiriakos. // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 2009. — N 159. — P. 1—9.
68. Ansari M. Rheology and Processing of HDPEs: Effects of Molecular Characteristics / M. Ansari. — Vancouver: The University of British Columbia, 2012. — 162 p.
69. Hatzikiriakos S. G. Wall slip of molten high density polyethylene. Sliding plate rheometer studies / S. G. Hatzikiriakos, J. M. Dealy. // *The Society of Rheology*. — 1991. — N 35. — P. 497—523.
70. Hatzikiriakos S. G. Wall slip of molten high density polyethylenes. Capillary rheometer studies / S. G. Hatzikiriakos, J. M. Dealy. // *Journal of rheology*. — 1992. — N 36. — P. 703—730.
71. Chen Y. Effects of surface roughness and the chemical structure of materials of construction on wall slip behavior of linear low density polyethylene in capillary flow / Y. Chen, D. Kalyon, E. Bayramli. // *Journal of applied polymer science*. — 1993. — N 50. — P. 1169—1177.

72. Person T. J. The effect of die materials and pressuredependent slip on the extrusion of linear low-density polyethylenes / T. J. Person, M. M. Denn. // *Journal of Rheology*. — 1997. — N 41. — P. 249—265.

73. Жданов Ю. А. Пристенные эффекты при течении полиэтилена в цилиндрических каналах / Ю. А. Жданов, В. Ф. Дубовицкий. // *Химическое машиностроение*. — 1960. — № 9. — С. 21—27.

74. Козлов Л. Ф. Теоретические исследования пограничного слоя / Л. Ф. Козлов. — Київ: Наукова думка, 1982. — 293 с.

75. Жданов Ю. А. Исследование профиля скоростей при течении расплава полимера в цилиндрических каналах / Ю. А. Жданов, В. Ф. Дубовицкий. // *Химическое машиностроение*. — 1968. — № 8. — С. 42—47.

76. Development Length in Planar Channel Flows of Newtonian Fluids Under the Influence of Wall Slip / [L. L. Ferras, A. M. Afonso, M. A. Alves et al.]. // *Journal of Fluids Engineering*. — 2012. — N 134. — P. 1—5.

77. Hatzikiriakos S. G. Slip effects in tapered dies / S. G. Hatzikiriakos, E. Mitsoulis. // *Polymer Engineering and Science*. — 2009. — N 49. — P. 1960—1969.

78. Рябинин Д. Д. К расчету профиля подводящего канала плоскощелевых головок / Рябинин Д. Д., Самсоненко Ю. Н., Шевчишен С. Ю. // Сб. «Химическое машиностроение», вып. 25. — К.: «Техніка». — 1977. — С. 21-25.

79. Kalika D. Wall slip and extrudate distortion in linear low-density polyethylene / D. Kalika, M. Denn. // *Journal of Rheology*. — 1987. — N 91. — P. 815—827.

80. Atwood B. T. Measurements of slip at the wall during flow of high density polyethylene through a rectangular conduit / B. T. Atwood, W. R. Schowalter. // *Rheologica Acta*. — 1989. — N 28. — P. 134—146.

81. On the effect of the wall slip boundary conditon / L. L.Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho, O. S. Carneiro. // *Semana da Escola de Engenharia*. — 2011. — N 24. — P. 20—29.

82. Boundary slip in newtonian liquids: a review of experimental studies / [C. Neto, D. Evans, E. Bonaccorso та ін.]. // Reports on Progress in Physics. — 2005. — N 68. — P. 28—59.

83. Watanabe K. Slip of newtonian fluids at slid boundary / K. Watanabe, H. Mizunuma. // JSME international journal. Series B, fluids and thermal engineering. — 1998. — N 41. — P. 525—529.

84. Pereira G. Effect of variable slip boundary conditions on flows of pressure driven non-newtonian fluids / G. Pereira. // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. — 2009. — N 157. — P. 197—206.

85. Hydrodynamic slippage inferred from thin film drainage measurements in a solution of nonadsorbing polymer / R.Horn, O. Vinogradova, M. Mackay, N. Phan-Thien. // The Journal of Chemical Physics. — 2000. — N 112. — P. 64—88.

86. Inn Y. Hydrodynamic slip: Polymer adsorption and desorption at melt/solid interfaces / Y. Inn, S. Wang. // Physical review letters. — 1996. — N 76. — P. 467—470.

87. Barrat J. Large slip effect at a nonwetting fluid-solid interface / J. Barrat, L. Bocquet. // Physical Review Letters. — 1999. — N 82. — P. 4671—4674.

88. Estellé P. Squeeze flow of bingham fluids under slip with friction boundary condition / P. Estellé, C. Lanos. // Rheologica Acta. — 2007. — N 46. — P. 397—404.

89. Kazatchkov I. Relaxation effects of slip in shear flow of linear molten polymers / I. Kazatchkov, S. Hatzikiriakos. // Rheologica Acta. — 2010. — N 49. — P. 267—274.

90. Жданов Ю. А. Учет пристенных эффектов при расчете круглых и плоскощелевых каналов / Ю. А. Жданов, В. Ф. Дубовицкий, Д. Д. Рябинин. // Химическое машиностроение. — 1960. — № 13. — С. 21—27.

91. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. — М. : Химия, 1977. — 440 с.

92. Малкин А. Я. Реология: концепции, методы, приложения / А. Я. Малкин, А. И. Исаев. — СПб. : Профессия, 2007. — 560 с.
93. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: справочник / [А. И. Иванченко, В. А. Пахаренко, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1977. — 244 с.
94. Мікульонок І. О. Полімерні композиційні матеріали. Визначення реологічних властивостей / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2003. — № 6. — С. 58—61.
95. Яхно О. М. Основы реологии полимеров / О. М. Яхно, В. Ф. Дубовицкий— К.: Вища школа, 1976. — 822 с.
96. Archer L. A. Direct measurements of slip in sheared polymer solutions / L. A. Archer, R. G. Larson, Y. L. Chen. // Journal of Fluid Mechanics. — 1995. — N 301. — P. 133—151.
97. Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров / Я. Рабек. — Москва: Мир, 1983. — 384 с.
98. Івіцький І. І. Аналіз математичних моделей течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок. // Збірник доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 41—43.
99. Івіцький І. І. Аналіз методик визначення величини пристінних ефектів у полімерних матеріалах / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок. // Збірник доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 43—45.
100. Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов : ГОСТ 11645-73. — Москва : Издательство стандартов, 1973. — 12 с.

101. Босый В. В. Инженерные методы расчета погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / В. В. Босый, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов. — Киев, 1985. — 72 с.

102. Sokolskyi A. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment / A. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskyi. // *Modern Scientific Research and their Practical application*. — 2014. — N 21410. — P. 136—140.

103. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонюк, І. І. Івіцький. // *Журнал «Наукові вісті НТУУ «КПІ»»*. — 2014. — № 2. — С. 66—69.

104. Двойнос Я. Г. Уточнена методика оброблення експериментальних даних капілярної віскозиметрії / Я. Г. Двойнос, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2015. — № 1(14). — С. 51—54.

105. Експериментальні дослідження пристінних ефектів у полімерних матеріалах / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко. // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2015. — № 1(14). — С. 44—46.

106. Сівецький В. І. Експериментальні дослідження характеру пристінних ефектів у полімерних матеріалах / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // *Збірник доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»*. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 50—51.

107. Barnes H. A. An Introduction to Rheology / H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters. — Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. — 199 p.

108. A Rheological Viewpoint of Thermoplastic Melts — Worcestershire: Malvern Instruments Ltd, 2005. — 4 p.

109. Wall slip of HDPEs: Molecular weight and molecular weight distribution effects / [M. Ansari, W. Yong, M. Ashish and other]. // Journal of Rheology. — 2013. — N 57. — P. 927–948.

110. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — Москва: Наука, 1976. — 279 с.

111. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери. — Ленинград: Судостроение, 1980. — 384 с.

112. Моделювання плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2012. — № 1. — С. 60—63.

113. Дослідження плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2012. — № 1. — С. 63—66.

114. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, І. І. Івіцький. // Журнал «Хімічна промисловість України». — 2013. — № 6. — С. 34—37.

115. Ивицкий И. И. Моделирование пристенного скольжения полимера / И. И. Ивицкий. // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — № 3. — С. 8—11.

116. Сівецький В. І. Методики визначення наявності, характеру та величини пристінних ефектів при течії полімерних матеріалів / В. І. Сівецький,

О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — № 4. — С. 48—52.

117. Формування полімерних матеріалів. Дослідження впливу геометричних параметрів каналів обладнання на величину пристінних ефектів / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, В. І. Сівецький. // Хімічна промисловість України. — 2015. — № 4. — С. 41—44.

118. Математичне моделювання процесу плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // Збірник доповідей науково-практичної конференції студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенерго-ефективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». — К.: Січка, 2012. — С. 25—28.

119. Численное моделирование влияния пристенного слоя на процесс течения полимера в перерабатывающем оборудовании / В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // Materiały IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami-2013», Vol. 31. — Przemyśl: Nauka i studia, 2013. — P. 26—28.

120. Визначення вязкості пристінного шару при моделюванні процесів переробки полімерів / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // Тези доповідей Всеукраїнської конференції молодих учених та студентів «Сучасні технології одержання композиційних матеріалів, хімічних волокон і нанокompозитів». — 2013. — С. 18—19.

121. Методика учета пристенного скольжения полимера при моделировании каналов перерабатывающего оборудования / О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький. // Матеріали науково-практичної конференції «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». — 2014. — С. 32—33.

122. Алгоритм учета пристенного скольжения полимера в каналах формующего оборудования / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // Матеріали науково–практичної конференції студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». — К.: НТУУ «КПІ», 2014. — С. 42—44.

123. Сівецький В. І. Методика визначення наявності та природи пристінних ефектів при течії полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // Збірник доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 51—52.

124. Івіцький І. І. Врахування пристінних ефектів під час моделювання процесу виготовлення полімерної пакувальної плівки / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок. // Матеріали IV Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності». — 2015. — С. 171—173.

125. Івіцький І. І. Комп'ютерне моделювання течії розплаву полімерних матеріалів у програмному комплексі ANSYS Polyflow / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок. // Матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем. I частина». — 2015. — С. 79—81.

126. Пат. 82157U Україна, МПК В 29 С 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Рослов О.В., Коваленко К.Г., Івіцький І.І.; заявник та власник Сокольський О.Л. — № u201300518; заявл. 15.01.13; опубл. 25.07.13, Бюл. № 14.

127. Пат. 82205U Україна, МПК В 29 С 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Рослов О.В., Коваленко К.Г., Івіцький І.І.;

заявник та власник Сокольський О.Л. — № u201301458; заявл. 07.02.13; опубл. 25.07.13, Бюл. № 14.

128. Пат. 102908U Україна, МПК В 29 С 47/60. Черв'як екструдера / Сокольський О.Л., Мікульонок І.О., Івіцький І.І.; заявник та власник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". — № u201504969; заявл. 21.05.15; опубл. 25.11.15, Бюл. № 22.

129. Модернізація черв'ячного екструдера / [В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, І. І. Івіцький та ін.] // Збірник доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 51—52.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Умовні позначення, що застосовуються у таблицях:

d – діаметр капіляру, мм;

l – довжина капіляру, мм;

M – вага навантаження, кг;

m – вага зразку, г;

t – час течії зразку, с;

Q_m – масова витрата матеріалу, кг/с;

\bar{Q}_m – середня масова витрата матеріалу, кг/с;

А.1. Дослідження полістиролу ПС-С-1-3

Досліджуваний матеріал – Полістирол ПС-С-1-3. Температура 200°C.

Таблиця А.1 – Результати експерименту з полістиролом ПС-С-1-3.

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
1	1	8	1,2	0,110	2820,51	0,039	0,04	5147	0,44
2				0,120	3076,92	0,039			
3				0,100	2223,67	0,045			
4			5,45	1,025	855,59	1,198	1,15	23374	12,35
5				1,180	1038,73	1,136			
6				0,960	855,73	1,122			
7			9,615	1,115	266,81	4,179	4,03	41236	43,17
8				1,020	242,05	4,214			
9				1,150	311,94	3,687			
10			14,61	1,040	106,80	9,738	10,13	62659	108,58
11				1,150	115,35	9,970			
12				0,915	85,74	10,672			
13			19,605	1,055	56,61	18,636	19,36	84081	207,63
14				1,075	55,64	19,320			

Продовження таблиці А.1

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
15				1,160	57,60	20,137			
16	1,18	8	1,2	0,095	922,33	0,103	0,10	6073	0,66
17				0,105	1060,61	0,099			
18				0,120	1157,73	0,104			
19			5,45	0,915	340,02	2,691	2,73	27581	17,80
20				0,940	359,88	2,612			
21				1,110	385,35	2,881			
22			9,615	0,940	102,50	9,171	9,36	48659	61,10
23				1,150	120,09	9,576			
24				1,060	113,46	9,342			
25			14,61	1,100	47,94	22,943	23,24	73937	151,63
26				1,010	43,26	23,348			
27				1,085	46,34	23,414			
28			19,605	1,195	26,01	45,936	44,01	99216	287,22
29				1,195	27,99	42,701			
30				1,145	26,38	43,405			
31	1,5	12	1,2	0,095	575,76	0,165	0,16	5147	0,51
32				0,115	714,29	0,161			
33				0,110	720,07	0,153			
34			5,45	1,135	282,34	4,020	3,96	23374	12,59
35				0,915	238,97	3,829			
36				1,010	250,01	4,040			
37			9,615	1,155	84,76	13,626	13,22	41236	42,01
38				0,910	69,36	13,120			
39				1,170	90,52	12,926			
40			14,61	1,000	30,61	32,668	32,14	62659	102,10
41				0,980	29,18	33,586			
42				0,980	32,49	30,165			
43			19,605	0,960	15,77	60,880	60,00	84081	190,61
44				0,995	16,44	60,540			
45				0,995	16,99	58,574			
46	2	16	1,2	0,110	269,61	0,408	0,41	5147	0,54
47				0,100	254,45	0,393			
48				0,100	240,96	0,415			
49			5,45	1,040	112,69	9,229	9,42	23374	12,63
50				1,060	117,15	9,048			
51				0,930	93,15	9,984			
52			9,615	1,080	36,81	29,337	30,66	41236	41,10
53				0,990	31,86	31,069			

Продовження таблиці А.1

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
54	2,095	16	14,61	0,940	29,76	31,584	73,17	62659	98,07
55				0,945	12,62	74,853			
56				1,045	13,61	76,791			
57				0,980	14,44	67,875			
58			19,605	2,110	16,37	128,877	134,85	84081	180,74
59				2,070	14,94	138,573			
60				2,125	15,50	137,105			
61	2,095	16	1,2	0,115	225,49	0,510	0,51	5391	0,59
62				0,115	229,08	0,502			
63				0,105	203,50	0,516			
64			5,45	0,980	83,28	11,768	11,83	24484	13,80
65				1,165	99,68	11,687			
66				1,020	84,73	12,038			
67			9,615	1,180	30,18	39,096	38,50	43195	44,90
68				1,065	28,85	36,917			
69				0,950	24,06	39,491			
70			14,61	1,060	11,21	94,551	91,86	65635	107,12
71				1,075	11,54	93,132			
72				1,135	12,91	87,907			
73			19,605	2,160	12,39	174,402	169,28	88075	197,39
74				2,140	12,09	177,008			
75				1,990	12,72	156,425			
76	2,5	20	1,2	0,115	133,26	0,863	0,83	5147	0,57
77				0,120	152,28	0,788			
78				0,090	108,77	0,827			
79			5,45	0,915	50,60	18,084	18,35	23374	12,59
80				1,200	65,66	18,277			
81				1,065	57,02	18,677			
82			9,615	0,975	16,74	58,246	58,70	41236	40,28
83				1,175	19,87	59,147			
84				1,150	19,58	58,719			
85			14,61	1,990	13,88	143,381	138,33	62659	94,93
86				2,195	16,17	135,734			
87				2,085	15,34	135,888			
88			19,605	2,315	9,24	250,463	252,69	84081	173,40
89				2,625	10,21	257,066			
90				2,595	10,36	250,546			
91	3	24	1,2	0,110	76,60	1,436	1,40	5147	0,56
92				0,115	80,31	1,432			

Продовження таблиці А.1

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
93				0,115	85,46	1,346			
94				0,910	27,83	32,693			
95				1,180	39,61	29,788			
96				1,015	32,65	31,085			
97			5,45	0,950	9,51	99,880	31,19	23374	12,39
98				0,920	9,12	100,928			
99				1,180	11,97	98,584			
100			9,615	2,535	10,94	231,791	99,80	41236	39,63
101				0,920	9,12	100,928			
102				1,180	11,97	98,584			
103			14,61	2,535	10,94	231,791	235,17	62659	93,39
104				2,585	11,36	227,571			
105				2,405	9,77	246,139			
106			19,605	3,820	8,65	441,499	429,57	84081	170,59
107				3,865	8,78	440,419			
108				3,955	9,72	406,795			

А.2. Дослідження полістиролу ПС-С-1-3 за змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105

Досліджуваний матеріал – Полістирол ПС-С-1-3 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105. Температура 200°C.

Таблиця А.2 – Результати експерименту з полістиролом ПС-С-1-1 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105.

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
1	1	8	1,2	0,105	1779,66	0,059	0,06	5147	0,64
2				0,105	1779,66	0,059			
3				0,120	1977,26	0,061			
4			5,45	1,095	591,57	1,851	1,84	23374	19,68
5				1,200	660,79	1,816			
6				1,135	617,43	1,838			
7			9,615	1,155	173,66	6,651	6,64	41236	71,19
8				0,985	144,39	6,822			
9				0,995	154,37	6,445			

Продовження таблиці А.2

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
10			14,61	1,160	68,13	17,027	17,13	62659	183,65
11				1,095	61,69	17,751			
12				0,925	55,70	16,606			
13			19,605	1,100	34,14	32,222	33,34	84081	357,50
14				0,920	26,31	34,971			
15				1,085	33,04	32,836			
16	1,18	8	1,2	0,105	690,79	0,152	0,15	6073	0,97
17				0,100	689,66	0,145			
18				0,110	740,48	0,149			
19			5,45	0,905	201,42	4,493	4,38	27581	28,61
20				1,135	260,62	4,355			
21				0,925	214,82	4,306			
22			9,615	1,065	66,37	16,046	15,61	48659	101,88
23				1,080	66,72	16,187			
24				1,055	72,24	14,603			
25			14,61	1,125	27,54	40,857	39,80	73937	259,75
26				0,980	24,18	40,524			
27				1,180	31,03	38,029			
28			19,605	0,985	13,08	75,292	76,84	99216	501,47
29				1,130	14,70	76,869			
30				0,905	11,55	78,374			
31	1,5	12	1,2	0,100	423,73	0,236	0,24	5147	0,75
32				0,110	452,67	0,243			
33				0,115	507,78	0,226			
34			5,45	0,910	151,41	6,010	6,33	23374	20,10
35				0,930	144,34	6,443			
36				1,050	160,92	6,525			
37			9,615	0,925	41,71	22,177	21,75	41236	69,10
38				0,920	41,87	21,974			
39				1,165	55,20	21,106			
40			14,61	1,025	18,80	54,513	54,05	62659	171,71
41				1,155	20,37	56,708			
42				1,200	23,56	50,928			
43			19,605	1,185	11,40	103,954	102,48	84081	325,57
44				1,195	12,07	99,017			
45				0,995	9,52	104,469			
46	2	16	1,2	0,120	199,67	0,601	0,61	5147	0,81
47				0,120	202,36	0,593			
48				0,100	160,10	0,625			

Продовження таблиці А.2

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
49	2,095	16	5,45	0,990	66,64	14,856	15,29	23374	20,49
50				1,025	69,31	14,789			
51				1,120	69,04	16,223			
52			9,615	1,055	20,29	52,007	51,32	41236	68,78
53				0,980	18,24	53,719			
54				1,155	23,95	48,226			
55			14,61	1,105	8,66	127,633	125,26	62659	167,88
56				0,950	7,88	120,563			
57				1,015	7,96	127,585			
58			19,605	2,045	8,45	242,100	234,54	84081	314,35
59				2,175	9,41	231,194			
60				2,065	8,97	230,332			
61	2,095	16	1,2	0,095	117,00	0,812	0,78	5391	0,91
62				0,095	120,41	0,789			
63				0,110	150,53	0,731			
64			5,45	1,015	54,91	18,485	19,31	24484	22,52
65				1,125	56,60	19,875			
66				1,175	60,00	19,584			
67			9,615	1,090	17,16	63,530	64,47	43195	75,17
68				1,150	18,14	63,403			
69				1,025	15,42	66,470			
70			14,61	1,195	7,75	154,276	156,71	65635	182,74
71				0,995	6,26	158,942			
72				1,190	7,58	156,926			
73			19,605	2,040	6,74	302,536	292,59	88075	341,18
74				2,070	6,89	300,501			
75				2,170	7,90	274,741			
76	2,5	20	1,2	0,115	102,13	1,126	1,15	5147	0,79
77				0,110	95,99	1,146			
78				0,095	79,82	1,190			
79			5,45	1,180	42,30	27,895	29,09	23374	19,96
80				1,030	35,58	28,948			
81				1,090	35,83	30,418			
82			9,615	1,075	10,69	100,546	97,60	41236	66,98
83				1,115	11,85	94,054			
84				0,975	9,93	98,206			
85			14,61	2,130	8,72	244,327	238,19	62659	163,45
86				1,980	7,96	248,737			
87				1,960	8,85	221,505			

Продовження таблиці А.2

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
88			19,605	2,440	5,33	457,837	445,93	84081	306,00
89				2,310	5,17	447,043			
90				2,540	5,87	432,920			
91	3	24	1,2	0,090	45,39	1,983	2,09	5147	0,83
92				0,120	58,42	2,054			
93				0,095	42,75	2,222			
94			5,45	1,015	20,24	50,146	50,42	23374	20,02
95				1,165	22,54	51,687			
96				1,045	21,14	49,432			
97			9,615	0,985	5,96	165,251	166,54	41236	66,14
98				1,175	7,13	164,697			
99				0,940	5,54	169,687			
100			14,61	2,515	6,43	390,972	401,75	62659	159,54
101				2,590	6,24	415,303			
102				2,610	6,54	398,970			
103			19,605	3,620	4,71	768,208	746,03	84081	296,26
104				3,790	5,14	736,691			
105				3,750	5,11	733,193			

А.3. Дослідження вторинного полістиролу ПС-С-1-3

Досліджуваний матеріал – вторинний полістирол ПС-С-1-3 при температурі 200°C.

Таблиця А.3 – Результати експерименту з вторинним полістиролом.

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
1	1	8	1,2	0,095	1250,00	0,076	0,07	5147	0,80
2				0,115	1597,22	0,072			
3				0,095	1234,75	0,077			
4			5,45	0,955	520,72	1,834	1,85	23374	19,78
5				0,965	517,70	1,864			
6				1,150	625,86	1,837			
7			9,615	1,125	189,52	5,936	6,14	41236	65,79
8				1,010	166,97	6,049			
9				1,085	168,91	6,423			

Продовження таблиці А.3

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
10			14,61	1,035	68,00	15,220	14,88	62659	159,50
11				1,050	72,17	14,548			
12				1,160	78,06	14,861			
13			19,605	1,195	43,35	27,565	27,72	84081	297,23
14				0,995	34,77	28,617			
15				1,045	38,73	26,984			
16	1,18	8	1,2	0,095	620,92	0,153	0,15	6073	0,98
17				0,100	662,25	0,151			
18				0,105	709,51	0,148			
19			5,45	1,200	312,26	3,843	3,95	27581	25,80
20				1,105	273,65	4,038			
21				1,190	299,18	3,977			
22			9,615	1,055	81,67	12,918	13,46	48659	87,87
23				0,935	73,02	12,804			
24				0,940	64,06	14,673			
25			14,61	1,130	32,50	34,767	33,23	73937	216,83
26				0,985	29,18	33,760			
27				0,965	30,98	31,154			
28			19,605	0,915	14,08	64,990	62,69	99216	409,12
29				1,180	19,60	60,218			
30				1,005	15,98	62,873			
31	1,5	12	1,2	0,120	615,38	0,195	0,20	5147	0,65
32				0,090	436,89	0,206			
33				0,090	429,44	0,210			
34			5,45	1,040	188,99	5,503	5,33	23374	16,95
35				1,125	207,99	5,409			
36				1,070	210,23	5,090			
37			9,615	1,015	53,31	19,041	18,16	41236	57,70
38				1,165	63,24	18,422			
39				1,160	68,14	17,023			
40			14,61	1,065	23,33	45,643	44,80	62659	142,34
41				1,020	23,59	43,234			
42				1,125	24,71	45,535			
43			19,605	0,910	10,84	83,962	84,52	84081	268,51
44				0,990	11,34	87,305			
45				1,145	13,91	82,293			
46	2	16	1,2	0,095	197,51	0,481	0,48	5147	0,65
47				0,095	198,33	0,479			
48				0,120	243,71	0,492			

Продовження таблиці А.3

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
49	2,095	16	5,45	1,175	92,43	12,713	12,16	23374	16,30
50				1,065	84,22	12,646			
51				0,980	88,08	11,127			
52			9,615	1,145	29,27	39,125	40,76	41236	54,63
53				0,920	22,25	41,354			
54				1,075	25,72	41,797			
55			14,61	1,090	10,85	100,491	99,38	62659	133,19
56				0,910	9,52	95,540			
57				1,085	10,63	102,103			
58			19,605	2,140	11,32	188,987	185,93	84081	249,20
59				1,985	10,78	184,202			
60				2,130	11,54	184,614			
61	2,095	16	1,2	0,105	185,84	0,565	0,58	5391	0,67
62				0,100	182,15	0,549			
63				0,095	154,58	0,615			
64			5,45	0,925	61,58	15,021	14,96	24484	17,44
65				1,150	80,45	14,295			
66				1,175	75,50	15,563			
67			9,615	1,085	20,82	52,122	50,76	43195	59,19
68				1,025	19,52	52,520			
69				0,985	20,68	47,636			
70			14,61	1,005	8,34	120,539	124,90	65635	145,64
71				1,070	8,29	129,024			
72				1,005	8,03	125,124			
73			19,605	2,075	8,71	238,200	235,18	88075	274,24
74				1,935	8,48	228,075			
75				2,030	8,48	239,264			
76	2,5	20	1,2	0,115	140,42	0,819	0,81	5147	0,55
77				0,115	143,57	0,801			
78				0,110	138,11	0,796			
79			5,45	0,990	47,15	20,998	21,58	23374	14,81
80				1,165	54,38	21,422			
81				0,990	44,37	22,311			
82			9,615	1,000	12,92	77,388	74,08	41236	50,83
83				1,100	15,28	71,982			
84				1,160	15,92	72,858			
85			14,61	2,130	11,15	191,026	183,85	62659	126,16
86				2,165	11,52	187,976			
87				2,090	12,11	172,542			

Продовження таблиці А.3

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
88			19,605	2,475	7,37	335,915	348,30	84081	239,00
89				2,660	7,55	352,331			
90				2,410	6,76	356,644			
91	3	24	1,2	0,105	78,24	1,342	1,40	5147	0,56
92				0,095	67,71	1,403			
93				0,105	72,38	1,451			
94			5,45	1,125	31,94	35,226	36,76	23374	14,60
95				0,905	24,55	36,865			
96				1,060	27,76	38,190			
97			9,615	1,005	7,98	125,930	125,31	41236	49,76
98				1,175	9,50	123,737			
99				0,950	7,52	126,259			
100			14,61	2,435	7,56	322,237	309,38	62659	122,86
101				2,700	8,56	315,539			
102				2,550	8,78	290,356			
103			19,605	3,815	6,87	555,470	583,96	84081	231,90
104				3,890	6,69	581,708			
105				3,560	5,79	614,691			

А.4. Дослідження поліетилену високого тиску 15803-020

Досліджуваний матеріал – поліетилен високого тиску 15803-020 при температурі 200°C.

Таблиця А.4 – Результати експерименту з ПЕВТ 15803-020.

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
1	1	8	1,2	0,110	15714,29	0,007	0,01	5147	0,07
2				0,095	13571,43	0,007			
3				0,105	21102,12	0,005			
4			5,45	1,050	8536,59	0,123	0,12	23374	1,32
5				1,130	9416,67	0,120			
6				0,970	7695,93	0,126			
7			9,615	1,160	3109,92	0,373	0,37	41236	4,02
8				1,200	3305,79	0,363			
9				1,100	2838,34	0,388			

Продовження таблиці А.4

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
10			14,61	0,965	1176,83	0,820	0,85	62659	9,12
11				1,020	1218,64	0,837			
12				1,115	1245,42	0,895			
13			19,605	1,065	717,17	1,485	1,51	84081	16,24
14				1,080	731,21	1,477			
15				1,090	689,20	1,582			
16	1,18	8	1,2	0,095	7307,69	0,013	0,01	6073	0,09
17				0,095	6785,71	0,014			
18				0,115	8502,32	0,014			
19			5,45	1,200	4878,05	0,246	0,26	27581	1,69
20				0,905	3376,87	0,268			
21				1,065	4079,58	0,261			
22			9,615	1,180	1560,85	0,756	0,78	48659	5,10
23				1,125	1488,10	0,756			
24				1,055	1266,67	0,833			
25			14,61	1,060	624,26	1,698	1,77	73937	11,53
26				1,060	596,51	1,777			
27				0,945	517,21	1,827			
28			19,605	0,975	320,62	3,041	3,14	99216	20,47
29				0,995	326,23	3,050			
30				1,095	330,11	3,317			
31	1,5	12	1,2	0,095	5937,50	0,016	0,02	5147	0,05
32				0,100	6250,00	0,016			
33				0,090	5488,58	0,016			
34			5,45	1,175	3626,54	0,324	0,33	23374	1,04
35				1,130	3393,39	0,333			
36				1,200	3742,81	0,321			
37			9,615	1,190	1226,80	0,970	1,01	41236	3,20
38				1,075	1053,92	1,020			
39				1,190	1156,46	1,029			
40			14,61	1,055	462,72	2,280	2,31	62659	7,34
41				1,145	502,63	2,278			
42				0,960	404,67	2,372			
43			19,605	1,075	257,61	4,173	4,14	84081	13,16
44				1,190	297,20	4,004			
45				1,140	268,14	4,252			
46	2	16	1,2	0,100	3030,30	0,033	0,03	5147	0,04
47				0,115	3382,35	0,034			
48				0,100	3118,36	0,032			

Продовження таблиці А.4

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
49	2,095	16	5,45	0,950	1357,14	0,700	0,67	23374	0,90
50				1,145	1673,98	0,684			
51				1,000	1607,60	0,622			
52			9,615	1,170	545,45	2,145	2,07	41236	2,77
53				1,145	560,72	2,042			
54				1,010	501,58	2,014			
55			14,61	1,165	239,02	4,874	4,75	62659	6,36
56				1,005	220,20	4,564			
57				1,000	208,09	4,806			
58			19,605	2,085	239,22	8,716	8,52	84081	11,42
59				2,160	265,72	8,129			
60				2,095	240,50	8,711			
61	2,095	16	1,2	0,110	2972,97	0,037	0,04	5391	0,04
62				0,100	2702,70	0,037			
63				0,095	2394,69	0,040			
64			5,45	1,000	1261,03	0,793	0,80	24484	0,93
65				1,125	1363,64	0,825			
66				0,975	1256,10	0,776			
67			9,615	1,000	394,01	2,538	2,50	43195	2,92
68				1,145	455,99	2,511			
69				1,030	418,42	2,462			
70			14,61	0,950	164,79	5,765	5,81	65635	6,78
71				1,115	188,66	5,910			
72				1,065	184,68	5,767			
73			19,605	1,995	187,48	10,641	10,51	88075	12,26
74				2,150	195,08	11,021			
75				2,160	218,79	9,873			
76	2,5	20	1,2	0,095	2159,09	0,044	0,04	5147	0,03
77				0,115	2555,56	0,045			
78				0,105	2285,38	0,046			
79			5,45	0,945	888,16	1,064	1,06	23374	0,73
80				1,125	1022,73	1,100			
81				1,130	1118,22	1,011			
82			9,615	0,995	279,34	3,562	3,46	41236	2,37
83				0,915	274,86	3,329			
84				0,905	259,37	3,489			
85			14,61	1,985	239,73	8,280	8,28	62659	5,68
86				1,965	239,34	8,210			
87				1,930	230,76	8,364			

Продовження таблиці А.4

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
88			19,605	2,505	168,28	14,886	15,30	84081	10,50
89				2,480	154,46	16,056			
90				2,525	168,68	14,969			
91	3	24	1,2	0,105	1478,87	0,071	0,07	5147	0,03
92				0,115	1575,34	0,073			
93				0,100	1471,36	0,068			
94			5,45	1,025	600,12	1,708	1,70	23374	0,67
95				0,925	540,62	1,711			
96				0,940	561,26	1,675			
97			9,615	1,160	206,00	5,631	5,60	41236	2,22
98				1,020	178,85	5,703			
99				0,980	179,63	5,456			
100			14,61	2,675	194,23	13,772	13,48	62659	5,35
101				2,605	191,83	13,580			
102				2,485	189,90	13,086			
103			19,605	3,740	146,37	25,552	25,00	84081	9,93
104				3,710	144,44	25,686			
105				3,935	165,54	23,771			

А.5. Дослідження поліетилену високого тиску 15803-020 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105

Досліджуваний матеріал – поліетилен високого тиску 15803-020 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105 при температурі 200°C.

Таблиця А.5 – Результати експерименту з ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105.

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
1	1	8	1,2	0,095	7916,67	0,012	0,01	5147	0,12
2				0,090	7500,00	0,012			
3				0,115	11135,09	0,010			
4			5,45	1,020	5604,40	0,182	0,19	23374	2,00
5				1,140	6000,00	0,190			
6				0,915	4883,06	0,187			

Продовження таблиці А.5

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
7	1,18	8	9,615	1,005	1936,42	0,519	0,53	41236	5,70
8				1,180	2230,62	0,529			
9				1,160	2125,63	0,546			
10			14,61	0,980	834,04	1,175	1,15	62659	12,32
11				1,005	893,33	1,125			
12				1,005	875,77	1,148			
13			19,605	0,955	471,84	2,024	1,98	84081	21,19
14				1,085	535,01	2,028			
15				1,195	636,32	1,878			
16	1,18	8	1,2	0,105	4038,46	0,026	0,03	6073	0,17
17				0,120	4800,00	0,025			
18				0,105	4095,90	0,026			
19			5,45	0,920	2365,04	0,389	0,39	27581	2,58
20				1,135	2880,71	0,394			
21				1,155	2877,40	0,401			
22			9,615	1,160	1048,82	1,106	1,10	48659	7,20
23				1,195	1073,67	1,113			
24				1,190	1092,66	1,089			
25			14,61	1,195	534,68	2,235	2,35	73937	15,34
26				0,980	436,91	2,243			
27				1,055	409,85	2,574			
28			19,605	1,095	287,78	3,805	4,00	99216	26,12
29				1,120	289,78	3,865			
30				0,925	213,34	4,336			
31	1,5	12	1,2	0,105	2386,36	0,044	0,04	5147	0,14
32				0,095	2159,09	0,044			
33				0,095	2121,80	0,045			
34			5,45	0,950	1646,45	0,577	0,59	23374	1,86
35				0,965	1695,96	0,569			
36				1,175	1910,88	0,615			
37			9,615	0,970	648,83	1,495	1,55	41236	4,92
38				1,000	673,85	1,484			
39				1,145	687,72	1,665			
40			14,61	1,180	388,67	3,036	3,16	62659	10,05
41				1,195	366,12	3,264			
42				1,015	318,20	3,190			
43			19,605	1,075	213,04	5,046	5,23	84081	16,61
44				0,985	196,06	5,024			
45				0,970	172,83	5,613			

Продовження таблиці А.5

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
46	2	16	1,2	0,105	1250,00	0,084	0,08	5147	0,11
47				0,115	1402,44	0,082			
48				0,100	1205,27	0,083			
49			5,45	1,160	978,90	1,185	1,19	23374	1,59
50				1,060	894,51	1,185			
51				0,985	824,28	1,195			
52			9,615	1,010	317,11	3,185	3,23	41236	4,32
53				1,045	311,85	3,351			
54				1,080	343,95	3,140			
55			14,61	0,920	135,71	6,779	6,73	62659	9,02
56				1,195	178,87	6,681			
57				0,935	138,80	6,736			
58			19,605	1,980	176,57	11,214	11,29	84081	15,13
59				2,185	186,42	11,721			
60				2,145	196,04	10,942			
61	2,095	16	1,2	0,105	1082,47	0,097	0,10	5391	0,12
62				0,095	969,39	0,098			
63				0,115	1114,08	0,103			
64			5,45	1,025	689,77	1,486	1,43	24484	1,67
65				1,005	686,48	1,464			
66				1,060	791,16	1,340			
67			9,615	1,050	280,45	3,744	3,89	43195	4,53
68				1,055	281,11	3,753			
69				1,180	283,23	4,166			
70			14,61	0,955	116,96	8,165	8,12	65635	9,47
71				0,935	117,52	7,956			
72				1,055	127,82	8,254			
73			19,605	1,980	139,03	14,242	13,64	88075	15,91
74				2,050	147,92	13,859			
75				1,965	153,27	12,821			
76	2,5	20	1,2	0,090	596,03	0,151	0,16	5147	0,11
77				0,100	621,12	0,161			
78				0,105	686,11	0,153			
79			5,45	1,100	526,82	2,088	2,14	23374	1,47
80				1,035	496,40	2,085			
81				1,155	510,65	2,262			
82			9,615	1,025	174,26	5,882	5,75	41236	3,94
83				0,905	155,98	5,802			
84				1,130	203,30	5,558			

Продовження таблиці А.5

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
85			14,61	1,935	166,55	11,618	11,88	62659	8,15
86				1,970	163,98	12,014			
87				2,030	168,91	12,018			
88			19,605	2,515	132,94	18,919	19,80	84081	13,59
89				2,530	133,78	18,912			
90				2,380	110,33	21,571			
91	3	24	1,2	0,105	448,72	0,234	0,24	5147	0,09
92				0,115	493,56	0,233			
93				0,095	385,62	0,246			
94			5,45	0,925	285,14	3,244	3,37	23374	1,34
95				0,955	280,88	3,400			
96				1,110	320,44	3,464			
97			9,615	1,050	114,17	9,197	9,11	41236	3,62
98				1,195	133,49	8,952			
99				1,125	122,57	9,178			
100			14,61	2,510	127,90	19,624	18,96	62659	7,53
101				2,405	123,26	19,512			
102				2,655	149,68	17,738			
103			19,605	4,000	121,73	32,860	31,73	84081	12,60
104				3,650	116,51	31,329			
105				3,850	124,13	31,015			

А.6. Дослідження севілену 11104-030

Досліджуваний матеріал – севілен 11104-030 при температурі 200°C.

Таблиця А.6 – Результати експерименту з севіленом 11104-030.

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
1	1	8	1,2	0,115	2346,94	0,049	0,05	5147	0,51
2				0,120	2608,70	0,046			
3				0,115	2344,18	0,049			
4			5,45	1,110	1238,84	0,896	0,94	23374	10,08
5				0,925	1012,04	0,914			
6				1,050	1038,56	1,011			
7			9,615	1,105	380,25	2,906	2,87	41236	30,78

Продовження таблиці А.6

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
8				1,125	406,58	2,767			
9				1,115	379,53	2,938			
10				0,910	139,29	6,533			
11			14,61	1,115	167,69	6,649	6,53	62659	70,04
12				1,150	179,24	6,416			
13				0,915	81,57	11,218			
14			19,605	1,160	99,49	11,659	11,64	84081	124,86
15				1,060	87,91	12,058			
16				0,115	1074,77	0,107			
17	1,18	8	1,2	0,100	917,43	0,109	0,11	6073	0,69
18				0,105	1023,34	0,103			
19				1,195	587,22	2,035			
20			5,45	1,050	526,84	1,993	2,00	27581	13,04
21				1,005	511,59	1,964			
22				1,090	174,15	6,259			
23			9,615	0,960	157,33	6,102	6,01	48659	39,19
24				0,950	167,97	5,656			
25				0,910	65,60	13,873			
26			14,61	1,135	81,44	13,936	13,52	73937	88,21
27				1,055	82,80	12,742			
28				1,130	45,72	24,713			
29			19,605	1,050	42,29	24,826	23,91	99216	156,01
30				1,175	52,97	22,182			
31	1,5	12	1,2	0,105	889,83	0,118	0,11	5147	0,36
32				0,115	1008,77	0,114			
33				0,095	890,44	0,107			
34			5,45	1,125	466,80	2,410	2,31	23374	7,35
35				1,150	519,19	2,215			
36				1,005	433,32	2,319			
37			9,615	1,105	147,98	7,467	7,19	41236	22,84
38				0,915	133,38	6,860			
39				1,020	140,92	7,238			
40			14,61	0,905	52,30	17,303	16,57	62659	52,64
41				1,175	72,64	16,176			
42				1,110	68,39	16,230			
43			19,605	1,030	33,62	30,632	29,80	84081	94,68
44				0,995	31,80	31,288			
45				1,160	42,20	27,486			
46	2	16	1,2	0,100	427,35	0,234	0,24	5147	0,33

Продовження таблиці А.6

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
47	2,095	16		0,120	500,00	0,240			
48				0,110	423,28	0,260			
49				1,025	216,20	4,741			
50			5,45	1,135	231,87	4,895	4,93	23374	6,60
51				0,960	186,73	5,141			
52				0,990	63,16	15,674			
53			9,615	0,965	65,78	14,671	15,19	41236	20,36
54				1,120	73,52	15,234			
55				1,025	30,89	33,182			
56			14,61	0,945	26,47	35,696	34,85	62659	46,70
57				0,950	26,64	35,660			
58				1,995	30,65	65,100			
59			19,605	2,075	33,42	62,087	62,45	84081	83,70
60				2,190	36,40	60,171			
61				0,105	391,79	0,268			
62	2,095	16	1,2	0,095	353,16	0,269	0,27	5391	0,32
63				0,105	373,10	0,281			
64				1,000	173,43	5,766			
65			5,45	0,950	158,54	5,992	5,84	24484	6,80
66				1,005	174,86	5,748			
67				1,105	59,91	18,444			
68			9,615	0,990	53,74	18,421	18,41	43195	21,47
69				0,985	53,63	18,368			
70				1,185	26,87	44,107			
71			14,61	0,940	22,58	41,624	42,94	65635	50,07
72				0,910	21,12	43,082			
73				2,035	26,02	78,215			
74			19,605	2,200	29,36	74,939	77,86	88075	90,79
75				2,090	25,98	80,437			
76	2,5	20	1,2	0,095	265,36	0,358	0,35	5147	0,24
77				0,115	325,78	0,353			
78				0,120	369,82	0,324			
79			5,45	1,130	151,92	7,438	7,71	23374	5,29
80				1,040	132,33	7,859			
81				1,185	151,21	7,837			
82			9,615	0,920	36,56	25,164	24,73	41236	16,97
83				1,115	43,04	25,909			
84				0,950	41,09	23,120			
85			14,61	2,135	36,63	58,280	58,38	62659	40,06

Продовження таблиці А.6

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
86				2,030	33,63	60,358			
87				2,000	35,41	56,488			
88			19,605	2,470	24,25	101,87 3	106,76	84081	73,26
89				2,475	24,07	102,83 8			
90				2,455	21,24	115,56 4			
91	3	24	1,2	0,105	201,15	0,522	0,53	5147	0,21
92				0,120	217,79	0,551			
93				0,105	206,50	0,508			
94			5,45	1,075	92,17	11,663	12,12	23374	4,81
95				1,010	84,01	12,022			
96				1,045	82,49	12,668			
97			9,615	1,070	27,54	38,851	39,28	41236	15,60
98				1,010	25,90	38,994			
99				0,990	24,75	39,995			
100			14,61	2,450	25,35	96,657	93,45	62659	37,11
101				2,335	25,95	89,986			
102				2,665	28,44	93,707			
103			19,605	3,530	21,35	165,32 1	171,85	84081	68,24
104				3,595	21,12	170,22 3			
105				3,885	21,58	180,01 1			

А.7. Дослідження севілену 11104-030 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105

Досліджуваний матеріал – севілен 11104-030 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105 при температурі 200°C.

Таблиця А.7 – Результати експерименту з севіленом 11104-030 зі змащувальним агентом Zell Chemia CWM-105.

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
1	1	8	1,2	0,100	462,96	0,216	0,22	5147	2,38
2				0,115	539,91	0,213			
3				0,105	441,56	0,238			
4			5,45	0,980	318,29	3,079	3,21	23374	34,38
5				1,075	333,64	3,222			
6				1,160	349,50	3,319			
7			9,615	1,165	133,31	8,739	8,73	41236	93,58
8				0,960	111,80	8,587			
9				1,150	129,82	8,859			
10			14,61	1,190	65,54	18,157	18,26	62659	195,74
11				1,105	60,08	18,393			
12				1,105	60,65	18,218			
13			19,605	1,010	32,69	30,900	30,67	84081	328,81
14				0,915	30,54	29,956			
15				0,945	30,34	31,145			
16	1,18	8	1,2	0,100	201,61	0,496	0,49	6073	3,21
17				0,110	223,12	0,493			
18				0,095	194,57	0,488			
19			5,45	1,140	172,65	6,603	6,74	27581	44,01
20				1,055	163,57	6,450			
21				1,125	156,66	7,181			
22			9,615	0,930	51,08	18,205	18,00	48659	117,49
23				0,975	55,04	17,714			
24				1,055	58,31	18,093			
25			14,61	0,970	27,31	35,521	37,12	73937	242,24
26				0,930	24,53	37,906			
27				0,955	25,17	37,935			
28			19,605	1,030	16,11	63,953	61,73	99216	402,84
29				1,020	16,24	62,824			
30				1,200	20,54	58,413			
31	1,5	12	1,2	0,110	172,14	0,639	0,66	5147	2,10
32				0,105	157,19	0,668			
33				0,115	169,52	0,678			
34			5,45	1,075	114,34	9,402	9,06	23374	28,79
35				1,130	130,74	8,643			
36				1,165	127,47	9,139			

Продовження таблиці А.7

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
37			9,615	0,990	41,60	23,798	24,18	41236	76,83
38				0,965	40,27	23,963			
39				0,975	39,32	24,794			
40			14,61	0,955	18,31	52,157	49,86	62659	158,40
41				1,010	20,96	48,181			
42				1,080	21,93	49,240			
43			19,605	1,200	14,09	85,146	82,91	84081	263,39
44				1,120	13,25	84,539			
45				1,090	13,79	79,039			
46	2	16	1,2	0,105	61,26	1,714	1,70	5147	2,28
47				0,120	68,10	1,762			
48				0,110	68,00	1,618			
49			5,45	0,965	47,80	20,188	20,89	23374	28,00
50				1,165	56,53	20,607			
51				1,140	52,08	21,889			
52			9,615	1,185	22,42	52,845	53,58	41236	71,81
53				0,920	17,14	53,665			
54				1,100	20,29	54,226			
55			14,61	1,010	9,83	102,708	107,25	62659	143,74
56				1,090	10,68	102,094			
57				1,055	9,02	116,935			
58			19,605	2,015	11,50	175,280	174,67	84081	234,11
59				1,960	11,54	169,779			
60				2,080	11,62	178,958			
61	2,095	16	1,2	0,100	49,31	2,028	2,06	5391	2,41
62				0,105	51,19	2,051			
63				0,115	54,36	2,115			
64			5,45	1,015	39,85	25,473	25,53	24484	29,76
65				0,905	36,58	24,742			
66				1,185	44,95	26,363			
67			9,615	1,070	16,07	66,595	65,57	43195	76,45
68				1,120	17,19	65,136			
69				1,040	16,01	64,967			
70			14,61	1,070	8,17	130,932	131,41	65635	153,23
71				1,030	7,75	132,952			
72				0,990	7,60	130,331			
73			19,605	2,090	9,35	223,422	214,21	88075	249,78
74				2,180	10,41	209,442			
75				1,965	9,37	209,766			

Продовження таблиці А.7

№	d , мм	l , мм	M , кг	m , г	t , с	Q_m , кг/с	\bar{Q}_m , кг/с	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
76	2,5	20	1,2	0,120	39,09	3,070	3,18	5147	2,18
77				0,105	31,96	3,285			
78				0,120	37,75	3,178			
79			5,45	1,195	31,64	37,767	37,91	23374	26,01
80				1,075	28,49	37,737			
81				0,955	24,98	38,229			
82			9,615	0,985	9,78	100,677	96,09	41236	65,94
83				1,160	12,02	96,479			
84				1,085	11,91	91,102			
85			14,61	2,120	10,62	199,605	190,69	62659	130,85
86				1,980	10,13	195,466			
87				2,190	12,37	176,986			
88			19,605	2,385	8,05	296,294	308,70	84081	211,83
89				2,445	8,08	302,650			
90				2,545	7,78	327,163			
91	3	24	1,2	0,110	19,00	5,789	5,62	5147	2,23
92				0,110	19,01	5,786			
93				0,110	20,77	5,296			
94			5,45	1,065	17,40	61,218	64,14	23374	25,47
95				1,085	17,78	61,040			
96				1,155	16,46	70,170			
97			9,615	0,940	5,61	167,571	159,86	41236	63,48
98				1,060	6,93	152,978			
99				0,920	5,79	159,019			
100			14,61	2,390	7,69	310,633	313,33	62659	124,43
101				2,360	7,59	310,990			
102				2,480	7,79	318,353			
103			19,605	3,735	7,78	480,310	502,84	84081	199,68
104				3,985	7,70	517,831			
105				3,655	7,16	510,374			

ДОДАТОК Б

ПОВНИЙ ФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Таблиця Б.1 – Матриця дослідів для конічного каналу

№ дослідів	Фактори			Вихід		
	$D_{вх}, \text{мм}$	$L, \text{мм}$	$D_{вх}/D_{вих}$	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
1	0,5	10	1	—	—	—
2	0,5	10	3	—	—	—
3	0,5	10	5	—	—	—
4	0,5	30	1	—	—	—
5	0,5	30	3	—	—	—
6	0,5	30	5	—	—	—
7	0,5	50	1	—	—	—
8	0,5	50	3	—	—	—
9	0,5	50	5	—	—	—
10	5,25	10	1	—	—	—
11	5,25	10	3	—	—	—
12	5,25	10	5	—	—	—
13	5,25	30	1	—	—	—
14	5,25	30	3	—	—	—
15	5,25	30	5	—	—	—
16	5,25	50	1	—	—	—
17	5,25	50	3	—	—	—
18	5,25	50	5	—	—	—
19	10	10	1	—	—	—
20	10	10	3	—	—	—
21	10	10	5	—	—	—
22	10	30	1	—	—	—
23	10	30	3	—	—	—
24	10	30	5	—	—	—
25	10	50	1	—	—	—
26	10	50	3	—	—	—
27	10	50	5	—	—	—

Таблиця Б.2 – Нормування факторів та значення вихідного параметру для конічного каналу

№ досліджу	Фактори			Вихід		
	x_1	x_2	x_3	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
1	-1	-1	-1	17,57 %	14,03 %	15,01 %
2	-1	-1	0	28,75 %	24,31 %	40,52 %
3	-1	-1	1	36,21 %	31,63 %	53,85 %
4	-1	0	-1	19,39 %	15,83 %	16,84 %
5	-1	0	0	27,73 %	23,18 %	40,48 %
6	-1	0	1	62,54 %	60,11 %	67,28 %
7	-1	1	-1	20,28 %	16,86 %	17,73 %
8	-1	1	0	53,32 %	50,48 %	56,58 %
9	-1	1	1	36,03 %	31,69 %	53,32 %
10	0	-1	-1	2,28 %	1,72 %	0,35 %
11	0	-1	0	4,14 %	3,13 %	4,57 %
12	0	-1	1	5,68 %	4,35 %	11,42 %
13	0	0	-1	2,35 %	1,78 %	0,44 %
14	0	0	0	4,23 %	3,21 %	4,41 %
15	0	0	1	7,33 %	5,78 %	13,64 %
16	0	1	-1	2,37 %	1,79 %	0,46 %
17	0	1	0	4,74 %	3,66 %	5,07 %
18	0	1	1	8,52 %	6,85 %	14,96 %
19	1	-1	-1	1,17 %	0,88 %	0,02 %
20	1	-1	0	2,14 %	1,58 %	1,90 %
21	1	-1	1	2,87 %	2,16 %	4,87 %
22	1	0	-1	1,28 %	0,96 %	0,13 %
23	1	0	0	2,30 %	1,72 %	1,73 %
24	1	0	1	3,26 %	2,46 %	5,70 %
25	1	1	-1	1,29 %	0,98 %	0,14 %
26	1	1	0	2,33 %	1,75 %	1,70 %
27	1	1	1	3,32 %	2,51 %	5,70 %

Таблиця Б.3 – Матриця дослідів для прямокутного каналу

№ дослідів	Фактори			Вихід		
	$H=B$, мм	L , мм	H/B	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
1	0,5	10	1	—	—	—
2	0,5	10	3	—	—	—
3	0,5	10	5	—	—	—
4	0,5	30	1	—	—	—
5	0,5	30	3	—	—	—
6	0,5	30	5	—	—	—
7	0,5	50	1	—	—	—
8	0,5	50	3	—	—	—
9	0,5	50	5	—	—	—
10	5,25	10	1	—	—	—
11	5,25	10	3	—	—	—
12	5,25	10	5	—	—	—
13	5,25	30	1	—	—	—
14	5,25	30	3	—	—	—
15	5,25	30	5	—	—	—
16	5,25	50	1	—	—	—
17	5,25	50	3	—	—	—
18	5,25	50	5	—	—	—
19	10	10	1	—	—	—
20	10	10	3	—	—	—
21	10	10	5	—	—	—
22	10	30	1	—	—	—
23	10	30	3	—	—	—
24	10	30	5	—	—	—
25	10	50	1	—	—	—
26	10	50	3	—	—	—
27	10	50	5	—	—	—

Таблиця Б.4 – Нормування факторів та значення вихідного параметру для прямокутного каналу

№ досліджу	Фактори			Вихід		
	x_1	x_2	x_3	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
1	-1	-1	-1	16,84 %	13,48 %	6,44 %
2	-1	-1	0	30,13 %	25,19 %	18,23 %
3	-1	-1	1	39,57 %	34,06 %	28,21 %
4	-1	0	-1	15,06 %	12,03 %	5,30 %
5	-1	0	0	28,37 %	23,59 %	16,47 %
6	-1	0	1	33,90 %	28,71 %	21,94 %
7	-1	1	-1	12,72 %	10,15 %	4,01 %
8	-1	1	0	19,16 %	15,63 %	8,63 %
9	-1	1	1	28,47 %	23,80 %	16,35 %
10	0	-1	-1	2,29 %	1,74 %	0,12 %
11	0	-1	0	5,14 %	3,92 %	0,63 %
12	0	-1	1	8,00 %	6,16 %	1,50 %
13	0	0	-1	2,34 %	1,77 %	0,15 %
14	0	0	0	5,18 %	3,96 %	0,68 %
15	0	0	1	8,02 %	6,19 %	1,55 %
16	0	1	-1	2,35 %	1,78 %	0,16 %
17	0	1	0	5,19 %	3,97 %	0,69 %
18	0	1	1	8,03 %	6,20 %	1,56 %
19	1	-1	-1	1,07 %	0,92 %	0,03 %
20	1	-1	0	2,83 %	2,14 %	0,18 %
21	1	-1	1	4,52 %	3,44 %	0,46 %
22	1	0	-1	1,29 %	0,97 %	0,05 %
23	1	0	0	2,90 %	2,20 %	0,23 %
24	1	0	1	4,59 %	3,50 %	0,52 %
25	1	1	-1	1,29 %	0,98 %	0,05 %
26	1	1	0	2,92 %	2,21 %	0,23 %
27	1	1	1	4,60 %	3,51 %	0,54 %

ДОДАТОК В
ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ



**ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО
«БІЛЬШОВИК»**



1882-2012

03680, м. Київ,
проспект Перемоги, 49/2,
Т/факс: (044) 456-71-41,
e-mail: bolshevik@itpark.ua
Код підприємства 14308569

Р/р 26007301249471 Філія
«Київське міське відділення
ПАТ Промінвестбанк»,
МФО 322250,
Код ЄДРПОУ банку 09322254

Від 15.11.2013 № 1385-2

А К Т

**впровадження результатів науково-технічних розробок,
виконаних аспірантом кафедри ХПСМ ІХФ НТУУ «КПІ» Івиським І.І.
під керівництвом к.т.н., доцента кафедри ХПСМ ІХФ НТУУ «КПІ» Сокольського О.Л.**

Цим актом підтверджуємо, що результати науково-технічних розробок інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" в рамках виконання держбюджетної теми №2547-п "Розроблення високоефективних енерго-і ресурсозберігаючих технологічних засад процесів виготовлення конструкційних полімерних композиційних матеріалів", номер державної реєстрації 0112U000369, впроваджено на ПАТ «НВП «Більшовик»» (науковий керівник – к.т.н., проф. Сівецький В.І., відповідальний виконавець – д.т.н. Колосов О.Є.).

Науковцями НТУУ «КПІ» було розроблено та передано до використання на ПАТ «НВП «Більшовик»» науково-технічний продукт у вигляді методики автоматизованого проектування та 3D-моделей обладнання для виготовлення полімерних та гумотехнічних виробів, в якому застосовано сучасний підхід до проектування та моделювання.

Зокрема, були розроблені 3D-моделі форматора-вулканізатора та гумозмішувача, що випускаються на підприємстві, починаючи з 1980 року.

Створені тривимірні моделі конструкцій та вузлів дозволяють більш точно обґрунтувати вибір їх геометричних і конструктивних параметрів та уникнути багатьох помилок, характерних при використанні традиційних двовимірних креслень.

Було встановлено, що використання запропонованої методики автоматизованого проектування і конструктивних пропозицій дозволяє вдосконалити технологічні параметри технологічних процесів та конструкції робочих органів, за яких забезпечується підвищена продуктивність та якість виробів за умов зниження енергоємності процесів їх виробництва.

Очікуваний економічний ефект від впровадження технічних пропозицій з удосконалення конструктивного оформлення обладнання для виготовлення полімерних та гумотехнічних виробів при його виробництві на ПАТ «НВП «Більшовик»» складає 362 (триста шістьдесят дві) тис. грн. на рік.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

В.о. Голови правління –
Генерального директора

м.п.



Каплій Р.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Перший проректор
Національного технічного
Університету України
«Київський політехнічний
інститут»

Академія НАН України

Ю. І. Якименко

2016 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Івіцького Ігоря Ігоровича «Пристінні ефекти в процесах течії полімерів у каналах переробного обладнання», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Цим актом засвідчується, що дисертаційна робота асистента кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») Івіцького Ігоря Ігоровича «Пристінні ефекти в процесах течії полімерів у каналах переробного обладнання», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, відповідає напряму наукових досліджень НТУУ «КПІ» і безпосередньо пов'язана з держбюджетними науково-дослідними роботами:

– «Розроблення високоефективних енерго- і ресурсозберігаючих технологічних засад процесів виготовлення конструкційних полімерних композиційних матеріалів» (№ 2547-п, 2012–2013 рр., № ДР 0112U000369; замовник – Міністерство освіти і науки України);

– «Створення технологічних засад одержання високоміцних виробів з конструкційних композиційних матеріалів для спеціального машинобудування» (№ 2714-п, 2014–2015 рр., № ДР 0114U001524; замовник – Міністерство освіти і науки України);

– «Науково-технічні засади проектування обладнання для формування виробів з полімерних композицій із врахуванням їх в'язкопружних властивостей» (№ 2824-п, 2015–2016 рр., № ДР 0115U000178; замовник – Міністерство освіти і науки України).

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних, лабораторних та індивідуальних занять, виконання курсових проектів і робіт з дисциплін «Полімерне обладнання», «Реологія», а також під час виконання дипломного проектування на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ «КПІ».

Декан інженерно-хімічного
факультету,
д.т.н., проф.



Є.М. Панов

В.о. завідувача кафедри хімічного,
полімерного та силікатного
машинобудування,
к.т.н., проф.


18.1.16.

В.І. Сівецький